

N° d'Ordre

THÈSE

présentée

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR-INGENIEUR

par

Hossein SEDGHI

ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT DE CASES LYSIMÉTRIQUES

2 JUIN 1971

Soutenue le 1971 devant la commission d'examen

MM. L. GLANGEAUD	Président	
G. LUCAS	}	Examineurs
S. HENIN		
L. TURC		Invité



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550415_0024

THÈSE

Présentée

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

pour obtenir

**LE GRADE DE DOCTEUR-INGENIEUR
EN HYDROLOGIE**

par

Hossein SEDGHI

**ETUDE DE L'ÉCOULEMENT DE
CASES LYSIMETRIQUES**

Soutenue le

1971 devant la commission d'examen

MM. L. GLANGEAUD Président

G. LUCAS

S. HENIN

Examineurs

THÈSE

présentée

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR
EN HYDRAULIQUE

par

Monsieur J. BENOIST

ETUDE DE L'ÉCOULEMENT DE
CAISSES HYDRAULIQUES



Reçu par la bibliothèque de la Faculté

le 10 Mars 1904

M. J. BENOIST, Président

A. LUCAS

Examinateurs

S. J. BENOIST

PLAN

=====

INTRODUCTION

Première Partie : LYSIMETRES.

I - Installations lysimétriques

I - 1	Caractéristiques	1
I - 2	Différents types	2
I - 3	Remplissage	3

II - Etude du régime de drainage

II - 1	Drainage annuel	4
II - 2	Drainage semestriel	7
II - 3	Drainage mensuel	7
II - 4	Courbes des débits journaliers classés	13
II - 4 - 1	Parties de courbes correspondant aux débits intenses ($q > 0,5$ mm/j)	15
II - 4 - 2	Parties de courbes correspondant aux faibles débits ($0,5 < q < 0,95$ mm/jour)	15
II - 5	Conclusion	27

III - Etude des hydrogrammes du drainage (épisodes sélectionnés)

III - 1	Généralités	29
III - 2	Analyse des débits d'après les mesures journalières, étude de quelques cas caractéristiques	31

III - 2 - 1	Cas sélectionnés pendant les mois chauds	31
III - 2 - 2	Cas sélectionnés pendant les mois froids	42
III - 2 - 3	Conclusion sur les cas sélectionnés de "saison chaude " et de "saison froide	44
III - 3	Analyse des drainages recueillis par les appareils enregistreurs (intervalle de temps entre deux mesures souvent très inférieur à 24 heures)	48
III - 3 - 1	Généralités	48
III - 3 - 2	Analyse des hydrogrammes	60
III - 3 - 3	Quantité totale de drainage et sa répartition dans le temps	70
III - 3 - 4	Courbes de pluie et de drainages cumulés	73
III - 3 - 5	Hydrogrammes du drainage à partir d'une fonte de neige et pendant la période de gel	78
III - 3 - 6	Conclusion	81
III - 4	Tarissement	83
III - 4 - 1	Rappel de quelques formules appliquées à la courbe de tarissement du drainage	85
III - 4 - 2	Ajustement des données	85
III - 4 - 3	Description des courbes	86
III - 4 - 4	Etude d'ensemble des résultats obtenus dans l'étude du tarissement	87

Deuxième Partie : BACS EXPERIMENTAUX (abrités)

Généralités	100
I. - <u>Installation</u>	
I - 1 Remplissage	105
I - 2 Calcul de quelques paramètres du sol Densité, porosité, etc	106
II - <u>Expériences : étude du drainage</u>	
II - 1 Courbe de vidange des bacs après le remplissage	108
II - 2 Analyse des hydrogrammes du drainage de différents arrosages	112

Troisième Partie : EXAMEN DE MODELES

INTRODUCTION

I. - <u>Ecoulement de l'eau dans un cylindre capillaire</u>	
I - 1 Calcul du débit à une température donnée ...	127
I - 2 Influence de la température	128
II. - <u>Essais de confrontation avec des résultats expéri- mentaux concernant l'eau du sol</u>	129
II - 1 Tarissement et tubes capillaires	129
II - 2 Oscillations diurnes du drainage	131
II - 3 A propos d'autres modèles (égouttage).....	132
<u>Résumé et conclusions générales</u>	133

AVANT - PROPOS

Avant d'exposer les résultats de ce travail , je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé dans sa réalisation .

Je prie Monsieur le Professeur GLANGEAUD , Membre de l'Institut , de bien vouloir accepter ma respectueuse gratitude pour m'avoir permis de m'initier aux nouveautés techniques et scientifiques dans son laboratoire et je le remercie aussi de m'avoir fait l'honneur d'assurer la Présidence du Jury de cette thèse .

Ma très sincère reconnaissance s'adresse également à Monsieur le Professeur HENIN , Membre de l'Académie d'Agriculture , Chef de Département à l'Institut National de Recherches Agronomiques , qui m'a accueilli au Laboratoire des Sols et en acceptant la direction de cette thèse a toujours suivi mes travaux malgré sa lourde charge ; je le remercie vivement d'avoir facilité mon séjour en France grâce à son intervention sur le plan de ma bourse .

Je remercie infiniment Monsieur le Professeur LUCAS d'avoir accepté aimablement de faire partie de ce Jury .

C'est à Monsieur TURC , Maître de Recherches au Laboratoire des Sols du C. N. R. A. que je dois particulièrement la réalisation de ce travail , je suis très heureux de lui exprimer ma profonde reconnaissance pour les encouragements, les critiques et les conseils précieux dont il m'a fait profiter. Je n'oublie pas sa chaleureuse assistance tant sur le plan du travail que pour résoudre mes nombreux problèmes d'ordre personnel ; je le remercie beaucoup d'avoir été pour moi un soutien moral très précieux.

Je n'oublie pas non plus l'aimabilité de Monsieur BETREMIEUX, Directeur du Laboratoire des Sols qui a bien voulu me permettre de poursuivre mes recherches dans son Laboratoire et qui a facilité énormément la préparation de cette thèse ; je lui en suis très profondément reconnaissant.

Je remercie Messieurs FEODOROFF et MONNIER, Maîtres de Recherches au Laboratoire des Sols qui m'ont apporté également leur aide précieuse.

Mes remerciements s'adressent à tous les autres membres de l'équipe du Laboratoire des Sols (Personnel scientifique et technique et secrétaire° qui m'ont accepté parmi eux et qui m'ont apporté leur aide amicale.

En particulier, je dois remercier Madame LECERF pour son aide technique qu'elle n'a cessé de m'apporter tout au long de ce travail.

Je remercie d'autre part, très vivement Monsieur B. LENEUF, Ingénieur à la S C E T - Coopération pour avoir facilité le séjour de ma famille en France.

INTRODUCTION

Dans l'étude de divers problèmes concernant le régime hydrique des sols, et en particulier, la façon dont les sols drainent et se ressuient, on utilise depuis longtemps des cases lysimétriques ou lysimètres ; il s'agit de cuves remplies de terre, alimentées en eau par les précipitations ou artificiellement, à la base desquelles on recueille quantitativement l'eau qui a traversé la terre (1)

Dans ces installations expérimentales, on s'efforce de reproduire le mieux possible les conditions de sol en place, mais cette reproduction est toujours imparfaite ; en ce qui concerne le ressuyage, c'est la présence du fond drainant qui semble susceptible d'introduire les perturbations les plus graves, sauf lorsque le sol en place comprend une couche superficielle de texture relativement fine reposant sur un matériau plus grossier et qu'on peut utiliser des lysimètres de profondeurs supérieures à l'épaisseur de la couche de terre fine. En réalité, lorsque la condition précédente n'est pas remplie, on peut obtenir néanmoins des approximations convenables et l'emploi des cases s'est souvent montré très utile. Ceci justifie la poursuite d'études concernant le fonctionnement des cases lysimétriques ; c'est à certains aspects de ce fonctionnement qu'est consacré le travail que nous allons présenter. En étudiant l'écoulement de cases lysimétriques, la façon dont elles drainent, nous souhaitons apporter une contribution à la façon d'utiliser les cases et à la connaissance des conditions de drainage de certains sols.

(1) - Voir description d'une case lysimétrique au début du premier chapitre

Cette étude débute par une présentation du matériel utilisé : des lysimètres dans lesquels on étudie le régime de drainage d'un sol nu et sans végétation. Nous examinons l'évolution du drainage en fonction du temps et surtout sa décroissance au cours des périodes sans apport d'eau.

Les premiers hydrogrammes que nous considérons sont constitués par les relevés quotidiens de drainage, nous les avons complétés ensuite en utilisant des appareils enregistreurs qui permettent de suivre l'évolution du drainage pendant les intervalles de temps beaucoup plus courts. Tout au long de cette étude, nous avons comparé entre eux les résultats obtenus avec des cases à sol nu de profondeurs différentes : ce sont les trois profondeurs de 50 cm, 100 et 150 cm qui ont été utilisées.

Etant donné la fréquence des pluies naturelles, auxquelles sont soumises à Versailles les cases lysimétriques, il est très difficile de trouver des épisodes de tarissement complets ; il a paru donc nécessaire d'installer des modèles sous abri, arrosés artificiellement (arrosages représentatifs des pluies naturelles sur les lysimètres). Ces modèles que nous avons appelés "bacs expérimentaux" ont été installés dans une serre froide ; les mêmes études des hydrogrammes du drainage et du tarissement ont été réexaminées sur ces nouveaux appareils contenant les mêmes matériaux que les cases. Puisqu'on avait comparé les drainages de cases de profondeurs allant de 50 à 150 cm, on utilise des bacs ayant les mêmes profondeurs ce qui a permis de confirmer les différences observées entre les cases.

Enfin, nous avons calculé ce que serait la circulation de l'eau dans certains modèles constitués de "tubes capillaires" ; le tarissement, ainsi que l'effet de la température sur l'écoulement dans ces modèles, ont été examinés et les résultats ont été confrontés avec les observations expérimentales.

PREMIERE PARTIE

=====

CASES LYSIMETRIQUES

I. - INSTALLATIONS -

I. - 1 - CARACTERISTIQUES

Les cases lysimétriques sont des cuves enterrées ayant des parois verticales et un fond étanche, remplies par le matériau à étudier jusqu'à quelques centimètres de leur bord supérieur. La surface supérieure de ces matériaux est au niveau du sol environnant. L'eau du drainage est recueillie et mesurée par un évacuateur qui se trouve dans les cases que nous avons utilisées au point le plus bas.

Il existe de telles cases de dimensions très différentes ; leur surface varie d'une fraction de mètre carré jusqu'à plusieurs centaines de mètres carrés, (exemple : cases de 625 m² à Castricum, Pays-Bas) ; leur profondeur qui dépasse de quelques décimètres l'épaisseur de la couche du sol introduite dans la case est variable elle aussi. Nous présentons sur la figure I - 1 le plan et la coupe verticale d'une case prototype.

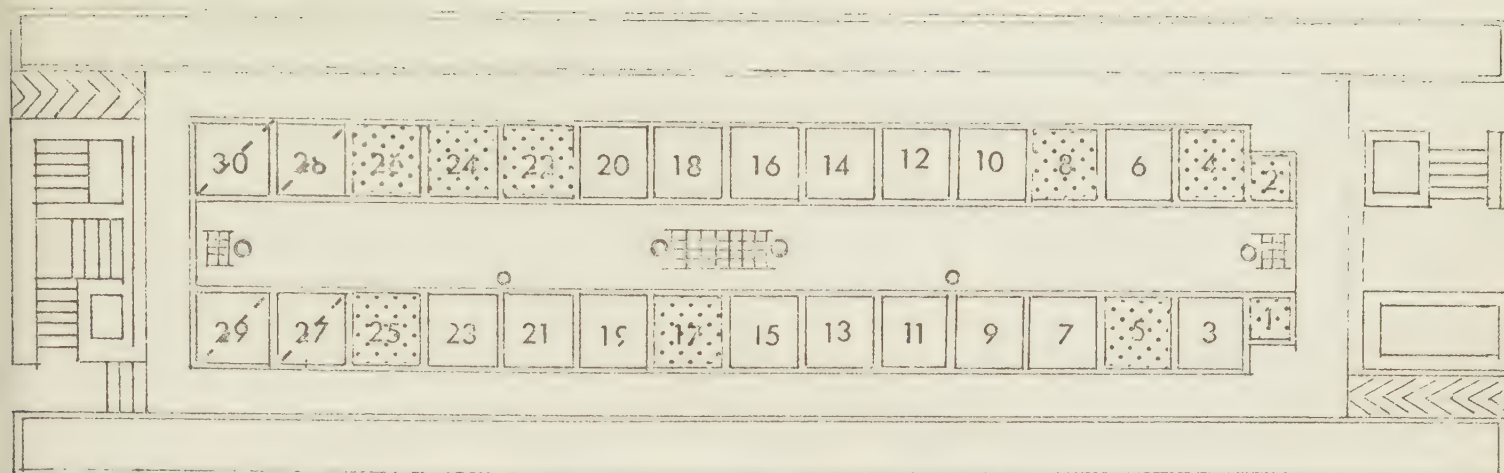
I - 2 - DIFFERENTS TYPES

On peut distinguer :

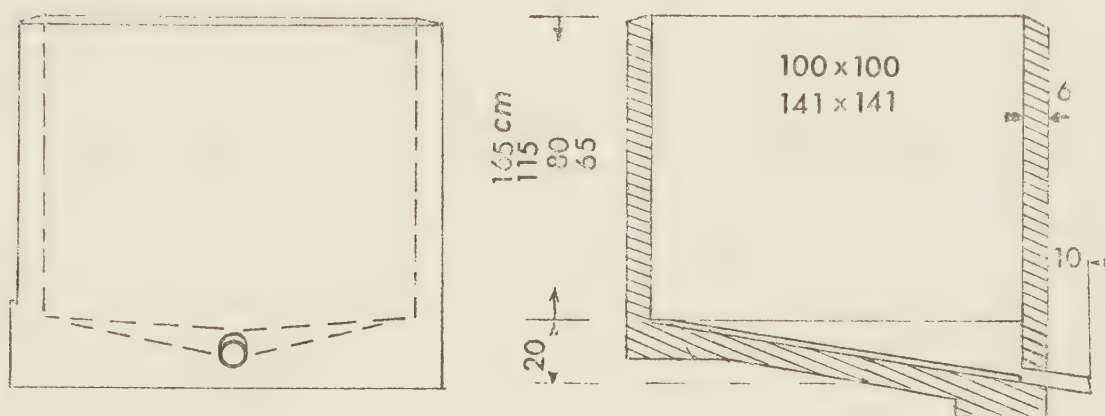
- Cases monolithes : cases bâties autour d'un bloc de terre non remanié ; le profil pédologique dans la case est le même que celui du sol environnant ;

ou bien cases remplies : le sol a été remanié et séché, puis introduit dans la case creusée et construite. Le profil pédologique peut être alors différent de celui du sol voisin ; le remplissage peut se faire

FIG. 1--1



- PLAN -



- COUPES VERTICALES -

SCHEMA DES INSTALLATIONS LYSIMETRIQUES
DU CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES AGRONOMIQUES
(VERSAILLES)

CASES NUES ETUDIEES :

N°	Surface m ²	Profondeur du sol m	remplies du:
1	1	0,60	granite broyé "horizon A"
2	1	0,60	
4	2	0,50	
5	2	1,0	
8	2	1,50	
17	2	1,50	
22	2	1,50	
24	2	1,50	
25	2	1,50	
26	2	1,50	
			"Horizon B"

en respectant l'ordre du profil du sol.

- Cases non pesables ou bien cases pesables : on obtient des cases pesables soit en les montant sur une bascule, soit par d'autres systèmes, on peut suivre ainsi les variations de l'humidité du sol d'après les variations du poids des cases.

Notre étude est basée sur les résultats d'observations lysimétriques faites au Centre National de Recherches Agronomiques de Versailles, sur des cases remplies, non pesables, installées et exploitées depuis janvier 1956. Nous étudions les drainages de cases dont le sol est nu, c'est-à-dire qu'il ne porte ni végétation, ni autre couverture (paille par exemple) ; de plus, il ne subit pas de traitement superficiel particulier (tel que damage ou binage). Parmi ces "cases nues", deux ont une surface de 1 m^2 et une profondeur utile (épaisseur de la terre) de 60 cm, et contiennent des matériaux différents du contenu des autres cases ; les autres ont 2 m^2 de surface, l'une ayant 0,50 m de profondeur utile, une autre 1 m et le reste 1,50 m.

I. - 3 - REMPLISSAGE

La terre utilisée pour le remplissage a été prise sur le domaine de la Minière, dans un secteur limoneux où on distingue trois couches superposées :

- une première couche superficielle de 30 cm d'épaisseur ayant 2 à 3 % de matières organiques, sans calcaire ;

- une deuxième couche ou couche intermédiaire, allant jusqu'à une profondeur de 70 à 100 cm avec 0,5 à 1 % de matières organiques et 30 % d'argile ($\phi < 2\text{ }\mu$) ; sans calcaire ;

- une troisième couche qui commence à partir de 100 à 130 cm de profondeur, contenant du calcaire.

C'est la deuxième couche qui a été utilisée ; la composition de cette terre est donnée dans le tableau I ci-dessous :

Classe de taille des particules	%
Argile ($\phi < 2\text{ }\mu$)	28,5
Limon fin (2 à $20\text{ }\mu$)	24,0
Limon grossier (20 à $50\text{ }\mu$)	44,5
Sable fin (50 à $200\text{ }\mu$) Sable grossier ($200\text{ }\mu$ à 2 mm)	2,4
Matières organiques	0,6

Tableau N.° 1 - Composition granulométrique

Le remplissage de ces cases a été effectué par submersion, afin que la terre atteigne de façon relativement rapide un état de tassement proche de celui du sol en place (la terre, séchée à l'air, est jetée dans l'eau où elle éclate, on veille à ce que tout au long du remplissage le niveau de la terre reste au-dessous du niveau de l'eau) ; ensuite, on a ouvert les goûtilles de drainage et les cases sont ressuyées.

On peut estimer qu'après deux ou trois ans, les caractères physiques du sol s'approchent de leur état initial.

Des comparaisons faites par différents auteurs entre les drainages mensuels des cases remplies et de certaines cases bâties autour de blocs de terre en place n'ont pas montré de différences notables.

II. - ETUDE DU REGIME DE DRAINAGE

Présentation du milieu de travail :

Les volumes de drainage journaliers pendant près de 14 années d'observations nous permettent de faire les dépouillements qui facilitent leur analyse pour en tirer les éléments qui nous intéressent. Nous avons présenté dans ce chapitre les drainages annuels, semestriels, mensuels, etc... par une série de tableaux et de graphiques, afin de comparer les résultats de trois cases ayant respectivement 50, 100 et 150 cm de profondeur.

II - 1 - DRAINAGE ANNUEL

Le tableau II - 1 - 1 présente la hauteur annuelle du drainage d'une case de 50 cm, d'une case de 100 cm et de six cases profondes de 150 cm. Les 14 années d'observations ont été découpées en 4 périodes et nous avons donné pour chacune la hauteur moyenne du drainage en mm par an.

Période	Années commençant au 1 ^{er} janv.	C. 4 0,5 m	C. 5 1,0 m	C. 8 1,5 m	C. 12 1,5 m	C. 17 1,5 m	C. 24 1,5 m	C. 25 1,5 m	C. 26 1,5 m
1	1956 - 58	217,26	259,52	234,81	263,80	253,35			
2	1959 - 62	297,48	295,24	311,47	312,82	303,56	305,68	299,65	292,44
3	1963 - 66	309,50	335,75	343,96	356,18	338,42	321,88	345,44	333,32
4	1967 - 69	271,75	284,26	303,63	323,23	318,31	318,58	313,23	321,45

Tableau N° II - 1 - 1

Comparaison des drainages annuels des lysimètres
(1956 - 1969)

Tableau N° II - 1 - 2

ANNEE	Hauteur du drainage en mm			
	Case 4 0,5 m	m de 1,50	M de 1,5	P
1959	325,00	249,12	336,40	470,3
1960	364,83	369,75	387,80	690,9
1961	263,40	266,60	290,40	557,3
1962	236,69	247,80	261,40	512,1
1963	209,13	225,19	244,89	576,5
1964	120,85	152,13	204,90	493,7
1965	445,10	447,40	490,26	837,4
1966	460,34	450,85	498,58	814,4
1967	290,73	303,13	321,25	640,4
1968	313,70	346,86	356,75	586,3
1969	210,83	258,78	305,82	603,2
Moyenne	291,56	306,84	336,20	616,5

$$(\bar{M} - \bar{m}) = 29,36 \text{ mm}$$

$$(\bar{m} - \bar{d}r 50) = 15,28 \text{ mm}$$

m = moyenne entre les 2 plus faibles valeurs de drainage de C150

M = moyenne entre les 2 plus fortes valeurs de drainage de C150

Sur ce tableau, les valeurs de la case de 50 cm sont presque toujours inférieures à celles des cases de 150 cm.

Parmi les drainages annuels de six cases profondes, les moyennes des deux valeurs les plus grandes (M) et celles des deux valeurs les plus faibles (m) ont été calculées et comparées avec les valeurs correspondantes de la case de 50 cm. Les données sont présentées dans le tableau II - 1 -2.

Sauf pour l'année 1959 où trois des six cases profondes qui venaient d'être mises en service ont drainé en quantité plus faible que les autres, on remarque que les valeurs de la case de 50 restent inférieures, exceptionnellement égales ou peu supérieures (1966), au plus faible drainage des cases de 150. La différence entre la hauteur moyenne annuelle de la case 50 et la moyenne des plus faibles valeurs est de l'ordre de 15 mm par an, tandis que la différence entre la moyenne des valeurs les plus fortes M et les plus faibles m, est deux fois plus grande.

Comme on n'a qu'une seule case de 50 cm qui soit remplie du même matériau que les cases profondes, on ne peut estimer si cette faible différence peut être considérée comme due à l'effet de la différence de profondeur ; la case de 1 m ne se distingue pas, ici, des cases de 1 m 50.

On ne met pas en évidence de liaison entre la profondeur des cases nues et le total annuel du drainage.

Il faut indiquer que les cases sont alignées en deux rangées parallèles, les cases peu profondes étant groupées à une extrémité. On pourrait craindre alors d'attribuer à des différences de profondeur des différences de drainage dues en réalité à des différences de position ; en fait, les comparaisons entre les drainages des cases profondes ont montré qu'il n'apparaît pas d'influence des positions relatives.

II. - 2 - DRAINAGE SEMESTRIEL

Etant donné la faiblesse des différences entre les quantités d'eau drainées par les lysimètres de profondeurs différentes au cours de périodes annuelles, les conditions ont paru convenables pour effectuer aisément des comparaisons portant sur des périodes plus courtes : le semestre et le mois. Nous avons découpé l'année en deux saisons, la première commençant le 1er avril et finissant le 30 septembre, la seconde à pour début le 1er octobre et pour fin le 31 mars de l'année suivante. Nous avons présenté les données pour trois cases dans le tableau II - 2.

En raison du pouvoir évaporant de l'atmosphère, une pluviosité donnée provoque un drainage plus important en hiver qu'en été ; le tableau II - 2 montre que, la pluviométrie moyenne sur 13 ans étant presque égale pendant la saison chaude et pendant la froide (48,2 % du total annuel pendant "l'hiver" et 51,8 % pendant "l'été"), le drainage moyen durant la saison chaude est seulement 20,3 % du total annuel pour la case de 50 cm, 21,1 % pour la case de 100 cm et 22,2 % pour la case de 150 cm.

Ces résultats montrent d'autre part que le rapport du drainage en été sur le total annuel a tendance à être légèrement plus élevé dans les cases plus profondes. Ceci semble dû à ce que, pour la case de 50 cm, les faibles débits deviennent rapidement presque nuls alors qu'ils se maintiennent plus longtemps à des valeurs notables pour les cases profondes (cette différence entre case de 50 cm et cases profondes sera mise en évidence plus loin, pour l'étude des drainages journaliers).

II. - 3 - DRAINAGE MENSUEL

La distribution de la quantité d'eau drainée au cours d'une année est, comme nous avons déjà indiqué surtout fonction de la répartition des précipitations et des facteurs climatiques qui conditionnent la fraction de celles-ci qui est perdue par évaporation.

En ce qui concerne les précipitations, nous avons calculé le coefficient pluviométrique de chacun des 12 mois de l'année moyenne pour la période de 1956 à 1969 ; ce coefficient est le quotient de la hauteur des précipitations mensuelles moyennes mesurées par une moyenne calculée ainsi : la précipitation annuelle est divisée par le nombre de jours de l'année et multipliée par le nombre de jours du mois. Les valeurs sont les suivantes :

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Coefficient Pluviométrique	1,03	0,82	0,67	0,94	0,94	1,04	1,08	1,18	1,07	1,11	1,07	1,04

Tableau II - 2

Drainage semestriel des cases lysimétriques en mm pour la période 1956 - 1969

Année	Case No 4 Case de 50 cm		Case No 5 Case de 100 cm		Case No 8 Case de 150 cm		Pluviométrie	
	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂	S ₁	S ₂
1956 - 57	23,7	167,9	45,0	182,6	18,8	148,0	263,7	243,5
1957 - 58	35,6	171,3	35,0	193,2	24,4	232,1	304,5	275,5
1958 - 59	96,7	235,6	153,6	244,0	106,5	236,5	414,5	293,8
1959 - 60	32,1	289,0	34,5	278,1	26,5	286,2	159,8	291,4
1960 - 61	64,4	292,7	53,2	304,8	59,7	319,6	322,2	343,9
1961 - 62	25,5	239,2	25,7	227,6	30,4	240,3	280,2	290,4
1962 - 63	32,0	172,3	35,0	182,3	41,4	185,6	290,6	187,5
1963 - 64	84,4	112,7	97,3	115,0	101,3	114,2	375,4	211,0
1964 - 65	11,4	215,0	25,3	223,0	22,2	221,9	264,4	289,3
1965 - 66	123,2	301,0	142,9	317,2	143,2	336,1	459,6	373,2
1966 - 67	85,6	303,3	104,5	303,3	110,4	317,0	351,9	400,0
1967 - 68	54,5	340,8	48,3	338,1	64,0	357,4	309,2	424,9
1968 - 69	70,7	164,6	81,1	186,5	94,1	193,0	364,4	239,1
Moyenne sur 13 ans	56,9	231,1	67,8	238,1	64,8	245,3	320,0	297,0
Moyenne sur 11 ans depuis 58 - 59	61,9	242,3	72,9	272,3	73,2	255,3	326,5	304,0
Total annuel	304,2		345,20		328,5		630,5	
%	20,3	79,7	21,1	78,9	22,2	77,8	51,8	48,2

S₁ : 1er Semestre d'Avril à Septembre

S₂ : 2ème Semestre d'Octobre à Mars

On voit qu'à Versailles, ce coefficient reste proche de 1, ce qui donne une distribution assez uniforme des précipitations au cours de l'année. Les variations du drainage d'un mois à l'autre sont alors dues surtout aux variations de l'évaporation.

Nous avons présenté les valeurs de précipitations et du drainage moyen mensuel dans le tableau II - 3 et sur la figure correspondante I - 2.

Le découpage de l'année en 12 mois ne pose pas de problème pour les précipitations qui sont faciles à déterminer pour chaque période, mais il n'en est pas ainsi pour le drainage dès qu'on s'occupe non plus de moyennes interannuelles mais d'une année particulière ; en effet, le drainage mesuré au cours d'un mois de calendrier n'est pas toujours représentatif du drainage dû à la pluie mensuelle, car une pluie survenant à la fin d'un mois va augmenter le drainage du mois suivant. Mais la division de l'année en périodes naturelles, intervalles de temps limités par le début d'une pluie et la fin du drainage correspondant, présente également des difficultés et manque de précision. Il ne s'agit dans le cas présent que d'une comparaison entre trois couches du sol d'épaisseurs différentes, et les erreurs dues à cet effet seront négligeables lorsqu'on considérera des moyennes interannuelles.

Nous avons ainsi observé que :

Le drainage est maximum pendant les mois de décembre et janvier, la quantité d'eau drainée dépasse la pluie mensuelle, nous avons vu que cela peut être dû à la quantité d'eau stockée dans le sol à l'état liquide à la fin du mois précédent, ou bien à l'effet du dégel qui provoque parfois un drainage important, ou encore à ce que les précipitations reçues par les cases seraient supérieures à ce qu'on mesure avec le pluviomètre.

Le minimum de drainage est observé au mois de juin, il est de l'ordre de 10 à 12 % du drainage maximum et de 10 % de la pluviométrie mensuelle. (1)

Cet examen des drainages mensuels précise un résultat observé sur les drainages semestriels : le drainage varie au cours de l'année approximativement en sens inverse du pouvoir évaporant de l'atmosphère, il est faible pendant les mois chauds et ensoleillés et élevé pendant les mois d'hiver.

La différence concernant les faibles drainages qui semblait apparaître dans l'étude des drainages semestriels (cf. II - 2) paraît se confirmer ici : pendant 13 ans, c'est-à-dire sur 156 mois, les mois

(1) Remarque :

La précipitation mensuelle de février est presque aussi faible que celle de mars, contrairement à ce qu'on a vu plus haut pour les coefficients pluviométriques, car ici on n'a pas corrigé les égalités de durée entre les mois.

Tableau N1 II - 3

Drainage et pluviométrie moyens mensuels

(Moyennes interannuelles de 13 années de janvier 1956 à décembre 1969)

MOIS	Drainage (moyennes mensuelles en mm)			Pluie moyenne mensuelle (en mm)
	Case 4 0,5 m	Case 5 1,0 m	Case 8 1,5 m	
Janvier	50,9	54,13	55,9	53,7
Février	30,6	31,5	34,0	38,5
Mars	14,2	17,6	19,9	35,2
Avril	11,3	14,7	14,8	47,5
Mai	6,9	9,4	9,4	48,8
Juin	5,5	7,1	5,9	52,2
Juillet	7,7	9,8	9,0	56,1
Août	9,5	10,7	11,7	59,3
Septembre	15,4	16,0	14,4	55,4
Octobre	24,9	26,0	25,5	55,7
Novembre	48,7	47,7	48,6	55,7
Décembre	52,8	52,1	55,0	52,4
Totaux	278,4	296,7	304,1	610,5

Fig. 1-2

DRAINAGE MOYEN MENSUEL DE 3 CASES

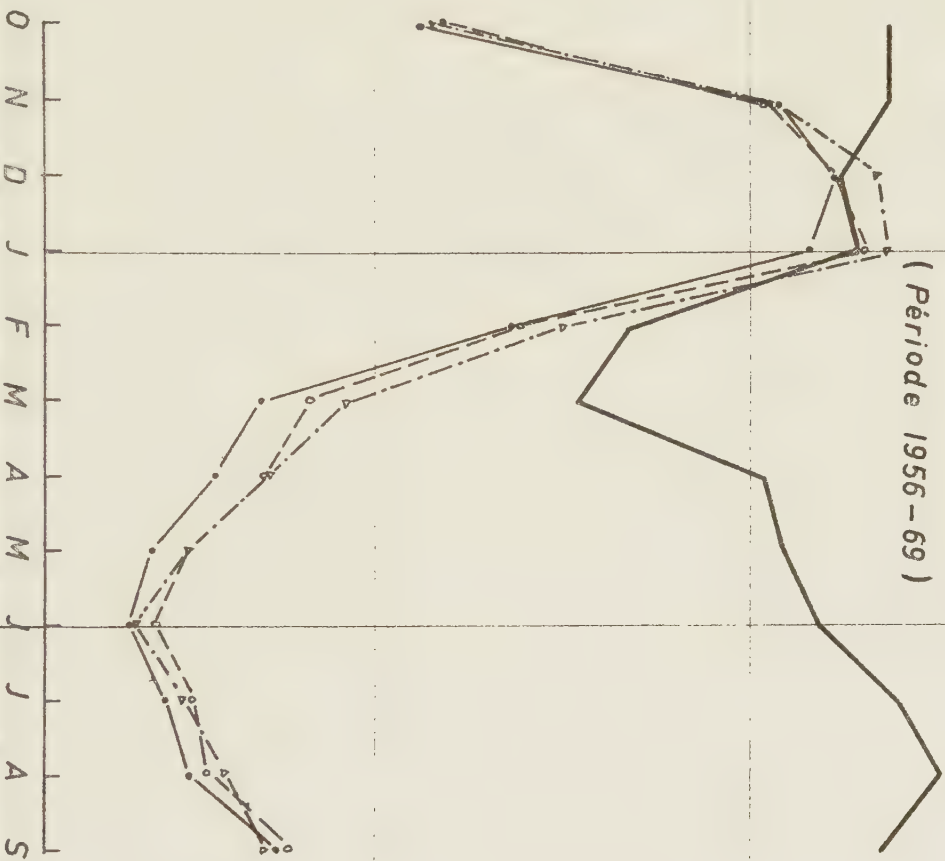
(Période 1956 - 69)

Drainage mm

60
50
40
30
20
10
0

O N D J F M A M J J A S

Pluie —
Case 50 cm —
" 100 - - -
" 150 Δ - - - Δ



à drainage très faible (ou nul) sont plus nombreux pour la case de 50 cm que pour les autres ; nous avons compté par exemple les mois pour lesquels le drainage est inférieur à 2 mm ; on en trouve

45 pour la case 4 (50 cm)
28 pour la case 5 (100 cm)
et 26 pour la case 8 (150 cm).

D'autre part, pour la case 22 (profondeur 150 cm), 17 mois sur 156 ont un drainage inférieur à 2 mm, enfin pour la case 1, peu profonde et remplie d'un matériau très différent, grossier, le nombre de ces mois est de 35, il est de 45 pour la case 2, peu profonde et remplie d'"horizon A". Les résultats concernant les cases 22, 1 et 2 sont en accord avec ce qu'on a obtenu pour les cases 4, 5 et 8, compte tenu des modifications apportées par le fait que les cases 1 et 2 contiennent des matériaux différents.

Disposant des valeurs mensuelles du drainage pour une installation de cases lysimétriques qui a longuement fonctionné avant les cases que nous utilisons maintenant (E. M. Bastisse, 1951), ainsi que pour des cases nues situées à Rothamsted qui ont pour nous l'avantage d'être, comme celles que nous étudions actuellement, de différentes profondeurs : une case de 50 cm, une de 100 cm et une de 150 cm, nous avons examiné le drainage mensuel de ces cases de la même façon que celui des cases 4, 5 et 8.

Pour une case nue ayant fonctionné à Versailles pendant les années 1936 à 1948 sur 156 mois, 64 ont eu le drainage inférieur à 2 mm, cette case peu profonde (60 cm) et d'ailleurs de surface plus faible que les nôtres (1 m²) semble donc avoir un comportement plus proche de celui de notre case 4 que de celui de nos cases profondes, la différence que nous avons vue apparaître entre la case 4 et les cases profondes semblant même ici très amplifiée ; précisons que notre case 2 a été construite de façon à reproduire le mieux possible cette ancienne case, elle a été remplie du même matériau, et à sec, comme l'avaient été les cases de Demolon et Bastisse.

L'examen des drainages mensuels à Rothamsted n'a rien apporté qui aille dans le sens des observations que nous venons de faire à Versailles. Sur 108 mois (1930 - 1938, Rothamsted Report for 1930 - 1938), 28 à 30 mois ont eu un drainage inférieur à 2 mm, ceci aussi bien pour la case de 50 cm que pour celles de 100 et 150 cm. Rappelons à ce propos qu'à cette époque, les cases de Rothamsted fonctionnaient déjà depuis une soixantaine d'années alors que les nôtres ne fonctionnent que depuis une dizaine d'années, qu'à Rothamsted les cases, ayant chacune une surface de 4 m² environ, ont été construites autour de monolithes de sol laissé en place, comportant plusieurs horizons pédologiques, alors que les nôtres ont été remplies (sous l'eau comme nous l'avons indiqué précédemment), on a réalisé un profil homogène constitué d'un matériau évidemment différent de celui de Rothamsted, enfin les conditions climatiques sont quelque peu différentes ; peut-être ces facteurs contribueraient-ils à expliquer que nous n'ayons pas retrouvé pour le drainage mensuel de Rothamsted les différences entre les cases de 50 cm et les cases profondes que nous avons observées à Versailles.

Comme nous l'avons déjà annoncé à la fin de II - 2, l'étude des drainages journaliers va permettre de préciser ces différences ; il semble que l'examen des drainages journaliers de Rothamsted montrerait peut-être des différences faibles mais dans le même sens, malgré le résultat négatif obtenu dans l'examen des drainages mensuels, en effet, dans une publication de Penman et Schofield (Penman et Schofield 1941), on peut lire : "(Après que la pluie a cessé), le débit décroît constamment, disparaissant en 24 heures (case de 50 cm), ou environ 48 heures (case de 150 cm)".

II. - 4 COURBES DES DEBITS JOURNALIERS CLASSES

Afin d'avoir une idée plus précise sur l'ordre de grandeur des variations de débits du drainage au cours d'une année ou un semestre d'une part, et pour comparer les résultats des cases de différentes profondeurs d'autre part, nous avons établi une série de courbes dites courbes des débits classés. Sur la période d'observation, nous avons sélectionné deux années caractéristiques, l'une étant relativement sèche et l'autre : humide. En les divisant en quatre semestres, nous avons classé les débits journaliers de chaque semestre par ordre de grandeur décroissante. Nous avons porté ensuite sur les diagrammes en ordonnées le débit journalier et en abscisses le numéro du jour d'après le classement en débits décroissants (on a employé des coordonnées semi-logarithmiques, si bien que les longueurs portées en ordonnées sont les logarithmes des débits); cette courbe donne en ordonnée le débit journalier qui a été atteint ou dépassé pendant le nombre de jours correspondant à l'abscisse.

On a ainsi obtenu douze courbes qui correspondent à trois cases, réparties sur quatre semestres. Pour faciliter la comparaison, chaque courbe a été coupée en deux parties, forts et faibles débits :

Tout débit supérieur à 1 litre en un jour équivalent à 0,5 mm en un jour (la surface des cases étant 2 m²), est classé comme fort, et inférieur à cette valeur, jusqu'à 0,1 l/j ou 0,05 mm en un jour comme faible. Nous avons négligé les débits au-dessous de 0,05 mm en un jour dont la fréquence est assez faible et la contribution au drainage total négligeable, de plus, au-dessous de cette valeur, la précision relative des mesures n'est pas suffisante.

Les périodes sélectionnées pour ce but sont les années 1961 - 62 et 1965 - 66, les quatre semestres ont été choisis de la façon suivante :

- 1er semestre du 1er avril 1961 au 30 septembre 1961
- 2ème semestre du 1er octobre 1961 au 31 mars 1962
- 3ème semestre du 1er avril 1965 au 30 septembre 1965
- 4ème semestre du 1er octobre 1965 au 31 mars 1966

Sur les graphiques I - 3 - 1 à I - 3 - 4 sont représentées les douze courbes.

De plus, nous avons réparti les débits journaliers en classes et nous avons établi des tableaux indiquant pour chacune des 12 courbes la répartition des drainages dans les différentes classes (tableaux II - 4 - 3 et II - 4 - 4).

Les courbes des débits classés sont très utilisées depuis longtemps dans les calculs hydrologiques des cours d'eau afin d'en tirer les débits caractéristiques tels que le débit maximum, débit de fréquence 1/2, débit de l'étiage, etc... Le but essentiel de leur utilisation dans notre étude est comme nous l'avons déjà dit :

1) Préciser l'ordre de grandeur des variations du débit du drainage d'une certaine épaisseur de sol, délimitée à sa partie supérieure par l'atmosphère et à sa partie inférieure, par des matériaux grossiers, au cours d'une période déterminée.

2) Voir ensuite si l'épaisseur utilisée (de 50 cm à 150 cm) peut avoir une certaine influence sur la forme de ces variations, en comparant les courbes concernant les différentes cases.

Nous avons dit que les quatre semestres sélectionnés ont été choisis de façon à ce qu'ils présentent des conditions hydriques et thermiques assez différentes. Voici ci-dessous la pluviométrie de chaque semestre, ainsi que la valeur moyenne intersemestrielle de 13 années d'observation du drainage.

Semestre	Avril - Septembre	Octobre - Mars
Valeur moyenne intersemestrielle	<u>320,0</u>	<u>297,7</u>
Année 1961 - 62	280,2	300,4
Année 1965 - 66	459,6	373,2

On voit que les deux semestres chauds sont très différents l'un de l'autre en ce qui concerne les précipitations ; ajoutons que les précipitations ont été distribuées, pour les quatre semestres, respectivement sur 66, 93, 97 et 101 jours.

L'examen de l'ensemble des douze courbes met en évidence deux sortes de variations sur la forme de ces courbes.

- Variation de la forme des courbes d'une même case d'une période de l'année à l'autre ; cela est dû, bien entendu, à la quantité d'eau drainée et à sa répartition dans le temps, conséquences de la variation des conditions climatiques.

- Variations au cours d'une même période de courbes correspondant aux cases de différentes profondeurs. La différence observée vient, en supposant toutes choses égales par ailleurs, de l'effet de la profondeur du sol. Nous examinons brièvement les résultats obtenus.

II - 4 - 1 Parties des courbes correspondant aux débits de drainage intenses ($q \geq 0,5 \text{ mm/j}$)

Cette partie des courbes a tendance à être assez peu différente pour les trois couches de différentes profondeurs. Sa pente varie d'une saison à l'autre suivant les précipitations et la température, etc ... et reste plus ou moins indépendante de la profondeur de la couche drainante. Le tableau ci-dessous présente le nombre de jours, pendant chaque période, couverts par cette partie de courbe.

Tableau II - 4 - 1

Nombre de jours de drainage avec $q \geq 0,5 \text{ mm/j}$

Semestre	Case 4 50 cm	Case 5 100 cm	Case 8 150 cm
Avril - Septembre 61	9	8	7
Octobre 61 - Mars 62	88	86	91
Avril - Septembre 65	25	29	26
Octobre 65 - Mars 66	85	92	92

II - 4 - 2 Parties correspondant aux faibles débits ($0,5 > q > 0,05 \text{ mm/j}$)

Contrairement à ce que l'on a observé pour la première partie, les courbes des débits de drainage classés avec $q < 0,5 \text{ mm/j}$ sont différentes d'une case à l'autre au cours d'une même période. La pente de cette courbe varie selon la profondeur de la couche drainante ; un tableau II - 4 - 2, pareil au précédent, montre le nombre de jours de drainage observé pour les trois cases, avec débit inférieur à $0,5 \text{ mm/j}$.

Tableau II - 4 - 2

Nombre de jours de drainage avec $0,05 < q < 0,5 \text{ mm/j}$

Semestre	Case 4 50 cm	Case 5 100 cm	Case 8 150 cm
Avril - Septembre 61	25	66	125
Octobre 61 - Mars 62	80	88	91
Avril - Septembre 65	31	76	144
Octobre 65 - Mars 66	19	54	88

Fig. I-3-1

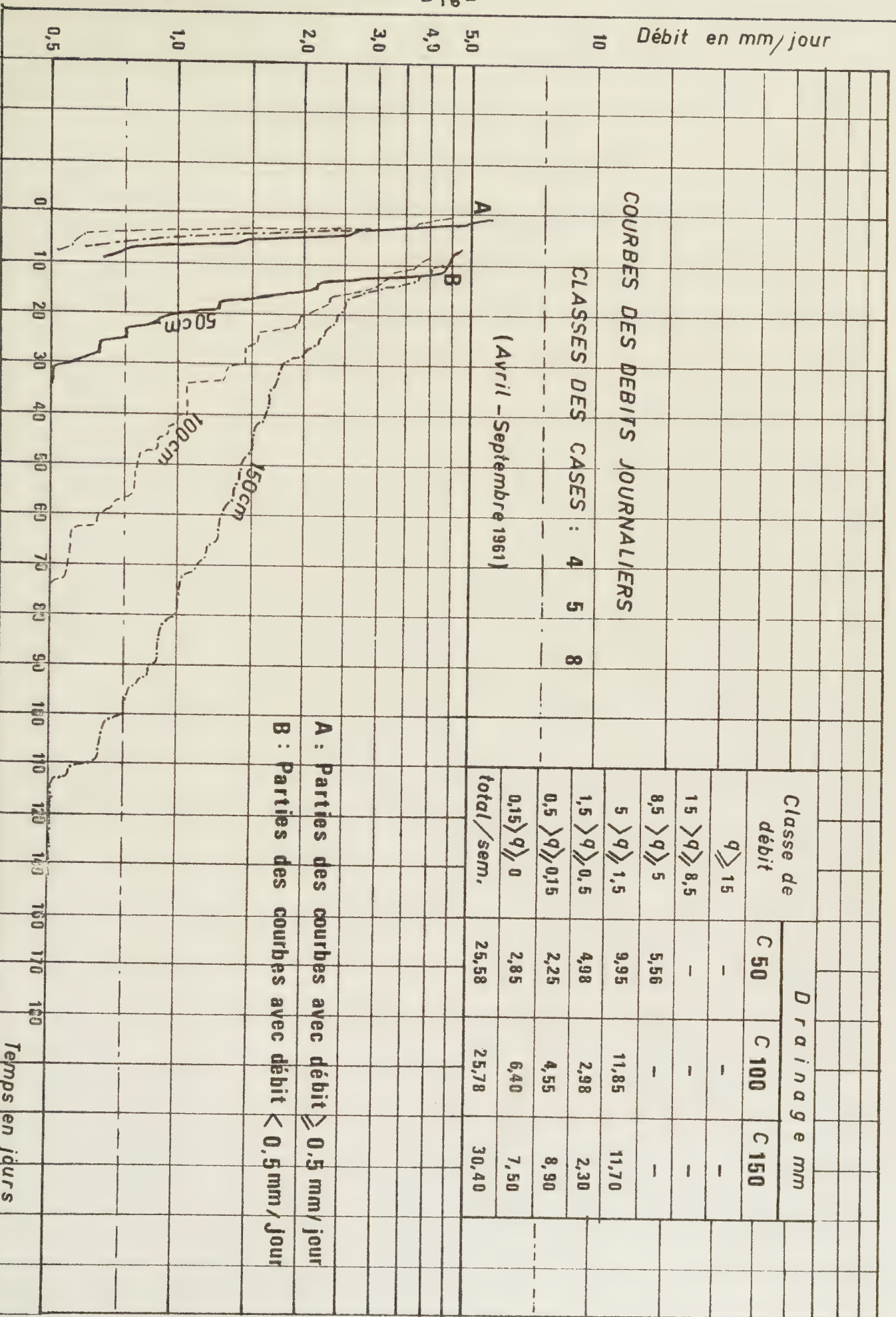


FIG. 1-3-2

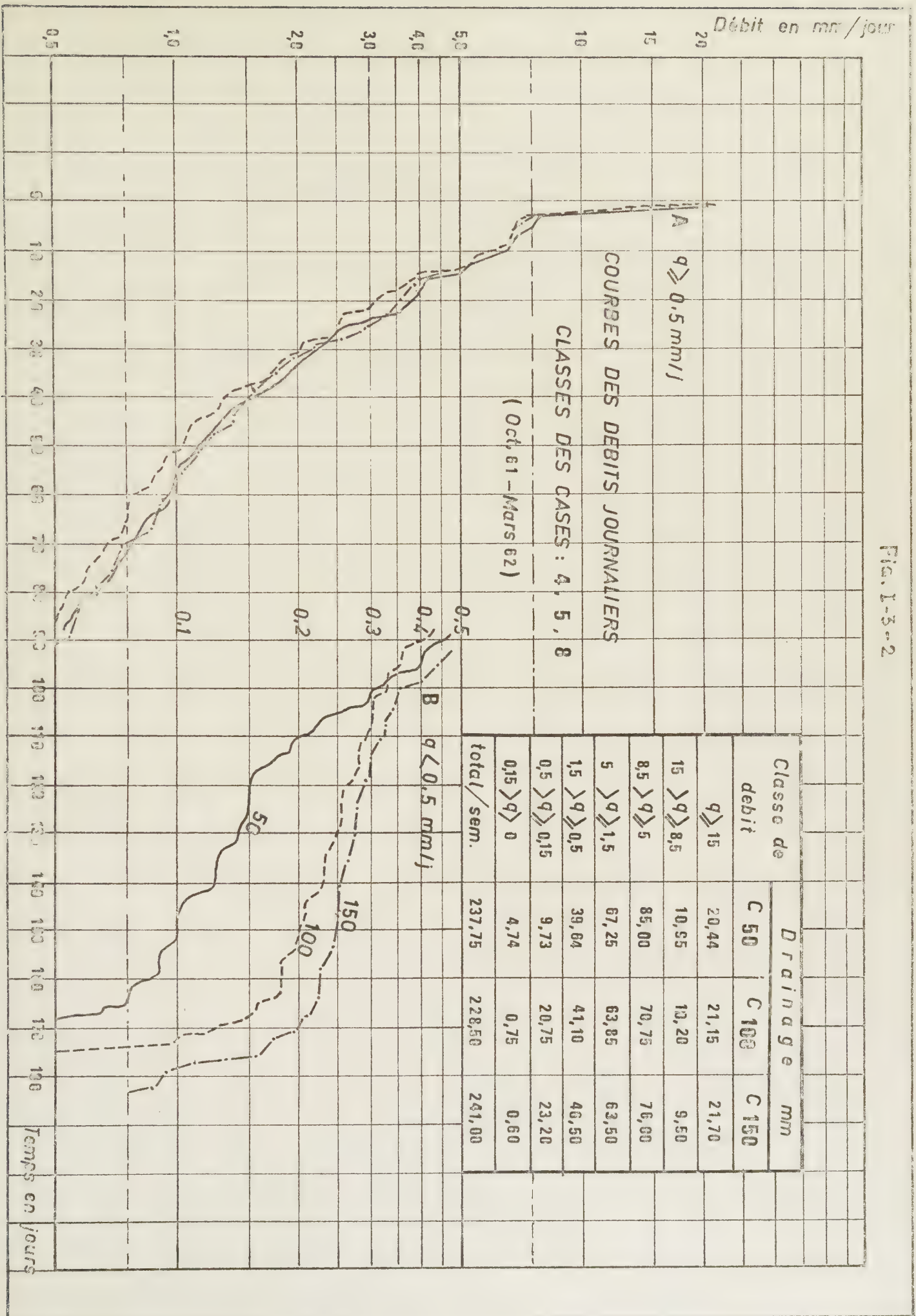


Fig. I-3-3

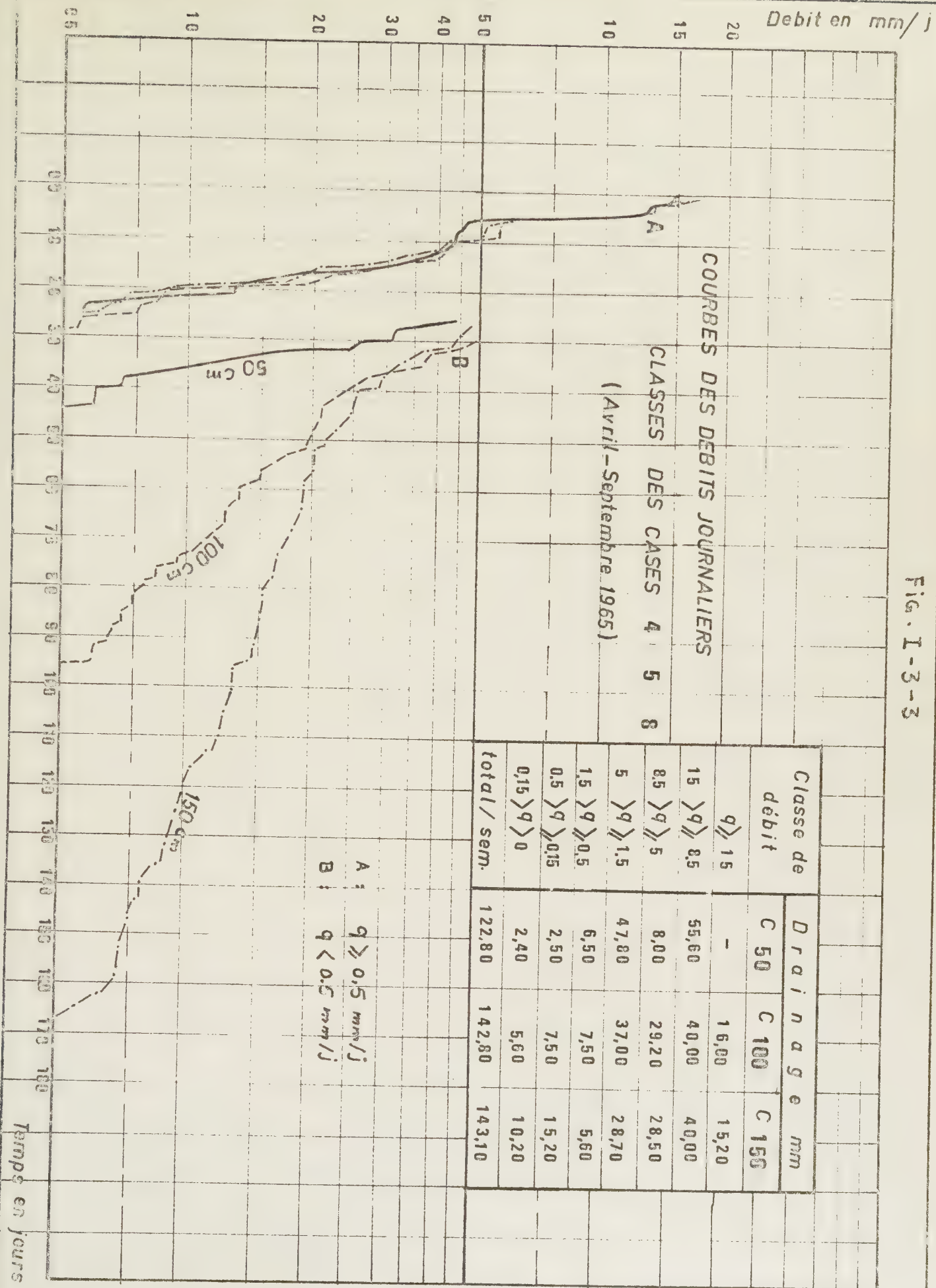
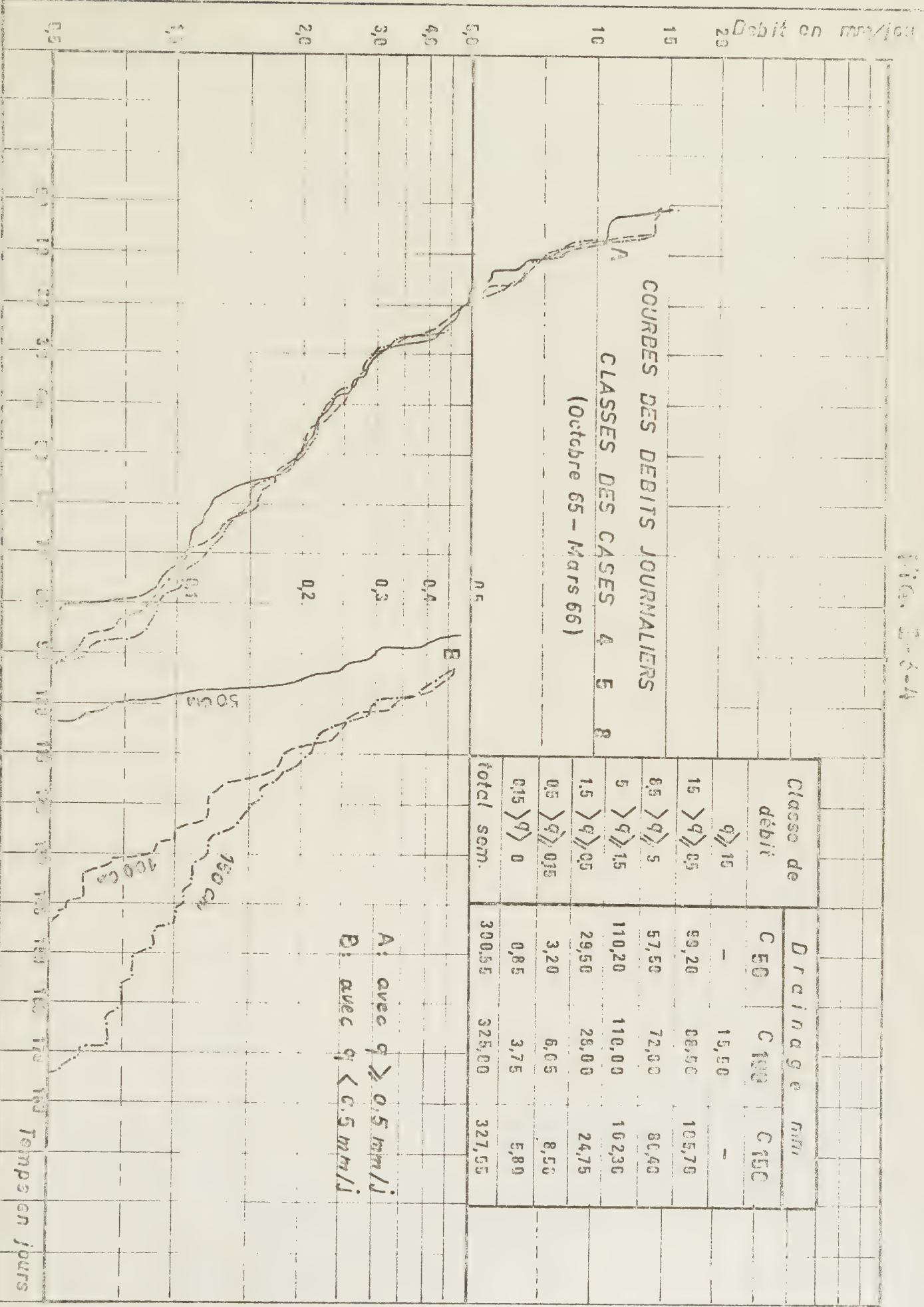


Fig. 2-3-4



D'autre part, les tableaux II - 4 - 3 et II - 4 - 4 récapitulent les hauteurs du drainage par chaque classe de débits, ainsi que la fraction avec les débits supérieurs à 0,5 mm/j et celle avec des débits inférieurs à ce seuil pour chaque semestre.

L'examen des tableaux II - 4 - 3 et II - 4 - 4 montre que :

Les quantités totales du drainage au cours d'un semestre pour trois couches de profondeurs différentes diffèrent assez peu, comme on l'a vu dans l'étude des "drainages semestriels". La différence atteint en valeur relative 20 % pour le semestre avril - septembre 1961 entre une case de 150 cm et celles de 100 et 50 cm, mais cela concerne de très faibles drainages si bien que la différence n'atteint pas 5 mm.

De même, les drainages donnés par les "débits intenses" ne diffèrent pas beaucoup suivant la profondeur du sol, les valeurs correspondant au drainage des trois cases restent voisines pour chaque semestre.

C'est ce qui concerne la hauteur de la lame d'eau drainée avec les "faibles débits" qu'une différence nette apparaît suivant la profondeur du sol. Ce pourcentage du drainage total du semestre, drainé avec $q < 0,5$ mm/j croît sensiblement avec la profondeur du sol. Par exemple, pour le semestre avril - septembre 1961, cette valeur varie de 19 % pour la case de 50 cm à 42 % pour la case de 100 cm et atteint 53 % pour celle de 150 cm de profondeur.

Ces différences sont beaucoup plus nettes pendant la saison chaude et cela pour deux raisons très simples : premièrement, les débits faibles ($q < 0,5$ mm/j) sont plus fréquents pendant les mois chauds de l'année ; deuxièmement, le débit demeure plus intense dans les cases plus profondes quand il est au-dessous de 0,5 mm/j.

Comparaison avec les drainages d'autres cases que les trois examinées ci-dessus :

La plupart des cases de l'installation ne diffèrent entre elles que par la profondeur et par le fait que le sol soit nu ou couvert. Parmi ces cases, nous étudions les drainages de celles dont le sol est nu, or, une seule d'entre celles-ci a une profondeur utile de 0,50 m et une seule une profondeur de 1 m ; c'est pourquoi l'étude des courbes des débits classés a porté sur trois cases, une seule pour chaque profondeur, case 4, case 5 et case 8 (0,50 m, 1 m et 1 m 50).

Bien que la case de 1 m donne souvent des résultats intermédiaires entre ceux des deux autres cases, il fallait chercher à confirmer les résultats par l'examen des drainages d'autres cases.

Nous avons donc effectué les mêmes opérations sur les drainages de deux autres lysimètres de 50 cm (en réalité, leur profondeur utile est plutôt de 60 cm) appartenant à la même installation mais qui diffèrent de celles déjà étudiées, d'une part par leur surface qui ne fait qu'un m² et d'autre part par les matériaux utilisés pour leur remplissage : l'une a été remplie avec du granite broyé et l'autre avec un échantillon de sol dit "horizon A". En même temps, pour la profondeur de 150 cm, nous avons examiné les résultats d'autres lysimètres que ceux de la "case 8" en particulier ceux de la "case 22" ; rappelons que ces cases de 150 cm, contrairement à celles de 50 cm, sont en principe identiques les unes aux autres.

Tableau II - 4 - 4

Distribution de drainages journaliers dans les différentes classes de débits

(Année 1961 - 62)

Classe de débit de drainage mm/jour	H a u t e u r d u d r a i n a g e e n m m							
	A v r i l - S e p t e m b r e 1 9 6 1				O c t o b r e 1 9 6 1 - M a r s 1 9 6 2			
	Case 4 50 cm	Case 5 100 cm	Case 8 150 cm	Case 4 50 cm	Case 5 100 cm	Case 8 150 cm	Case 4 50 cm	Case 5 100 cm
q 15	-	-	-	20,44	21,15	21,70		
15 q 8,5	-	-	-	10,95	10,20	9,50		
8,5 q 5,0	5,56	-	-	85,00	70,75	76,00		
5,0 q 1,5	9,95	11,85	11,70	67,25	63,85	63,50		
1,5 q 0,5	4,98	2,98	2,30	39,64	41,10	46,50		
0,5 q 0,15	2,25	4,55	8,90	9,73	20,75	23,20		
0,15 q 0,0	2,85	6,40	7,50	4,74	0,75	0,60		
Total / Semest;	25,58	25,78	30,40	273,75	228,50	241,00		
Total avec q 0,5	20,48	14,83	14,00	223,28	207,00	217,20		
Total avec q 0,5	5,10	10,95	16,40	14,47	21,50	23,80		
% Total avec q 0,5	19	42	53	6	9,4	9,9		
% de pluie drainée	9,1	9,2	10,8	79,2	76,0	80,0		

Distribution de drainages journaliers dans les différentes classes de débits

(Année 1965 - 66)

Classe de débits mm/jour	H a u t e u r d u d r a i n a g e e n m m					
	Avril - Septembre 1965			Octobre 1965 - Mars 1966		
	Case 4 50 cm	Case 5 100 cm	Case 8 150 cm	Case 4 50 cm	Case 5 100 cm	Case 8 150 cm
q 15	-	16,00	15,20	-	15,50	-
15 q 8,5	55,60	40,00	40,00	99,20	88,50	105,70
8,5 q 5,0	8,30	29,20	28,50	57,50	72,60	80,40
5,0 q 1,5	47,80	37,00	28,70	110,20	110,00	102,30
1,5 q 0,5	6,50	7,50	5,60	29,50	28,00	24,75
0,5 q 0,15	2,50	7,50	15,20	3,20	6,65	8,50
0,15 q 0,0	2,40	5,60	10,20	0,85	3,75	5,80
Total / Semestre	122,80	142,80	143,40	300,55	325,00	327,55
Total avec q 0,5	117,90	129,70	118,00	296,50	314,60	313,25
Total avec q 0,5	4,90	13,10	25,40	4,05	10,40	14,30
% Total avec q 0,5	3,9	9,1	17,7	1,3	3,2	4,3
% de pluie drainée	26,7	31,0	31,2	80,5	87,1	87,8

Débit en

COURBES DES DEBITS JOURNALIERS CLASSES DU DRAINAGE Case N° 1
(Période Avril - Septembre 1961)

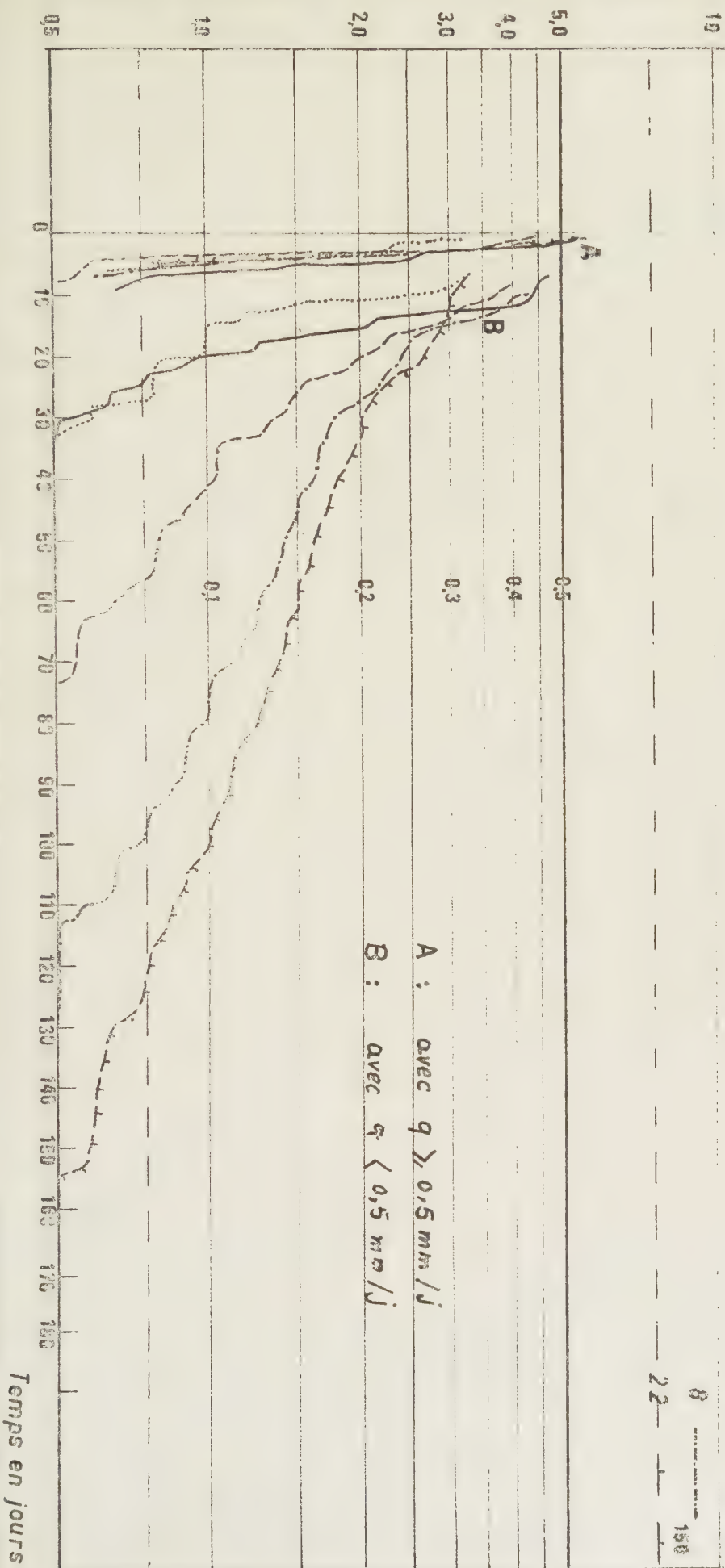


Fig. 1-3-6

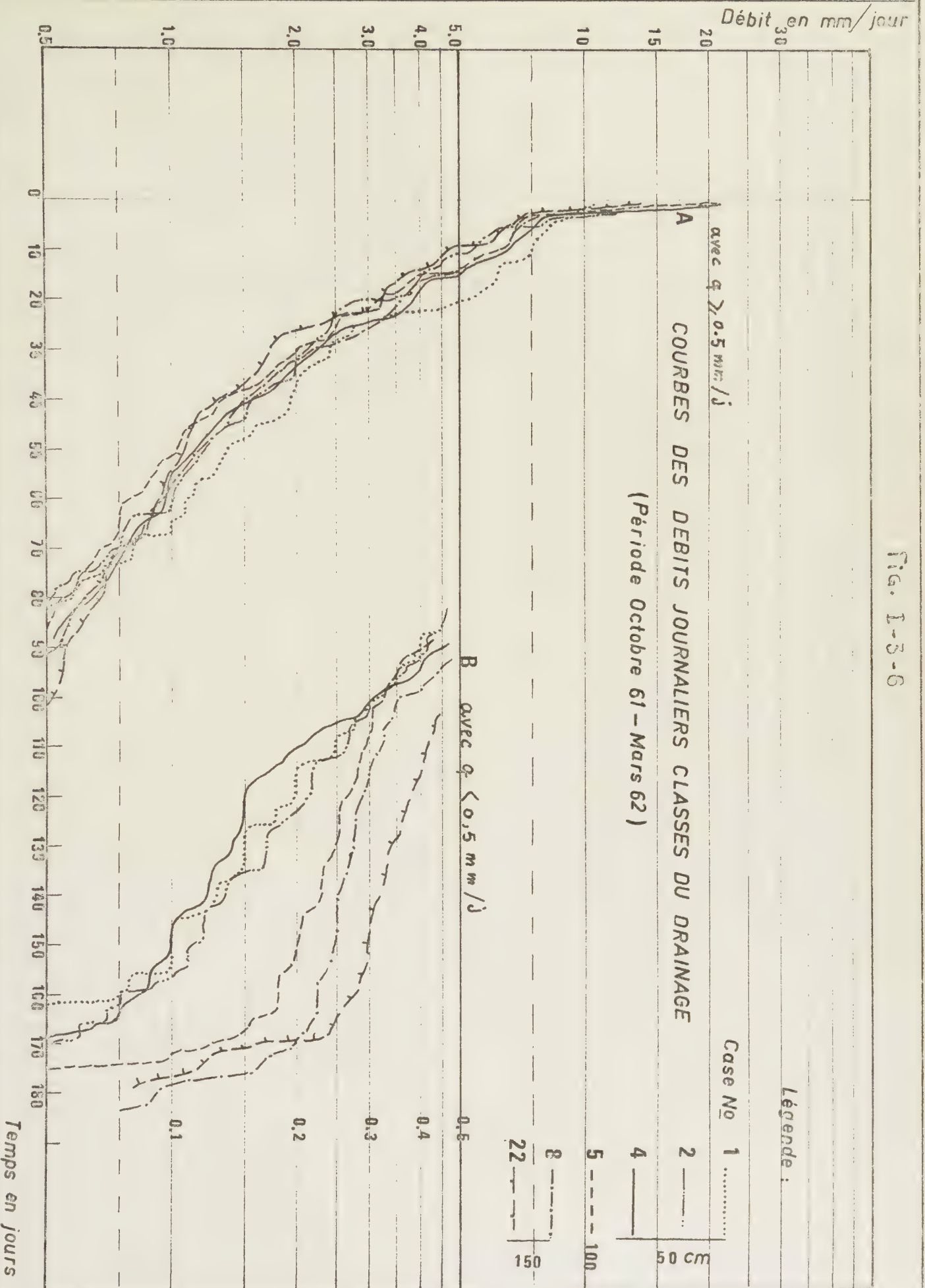


Fig. I-3-7

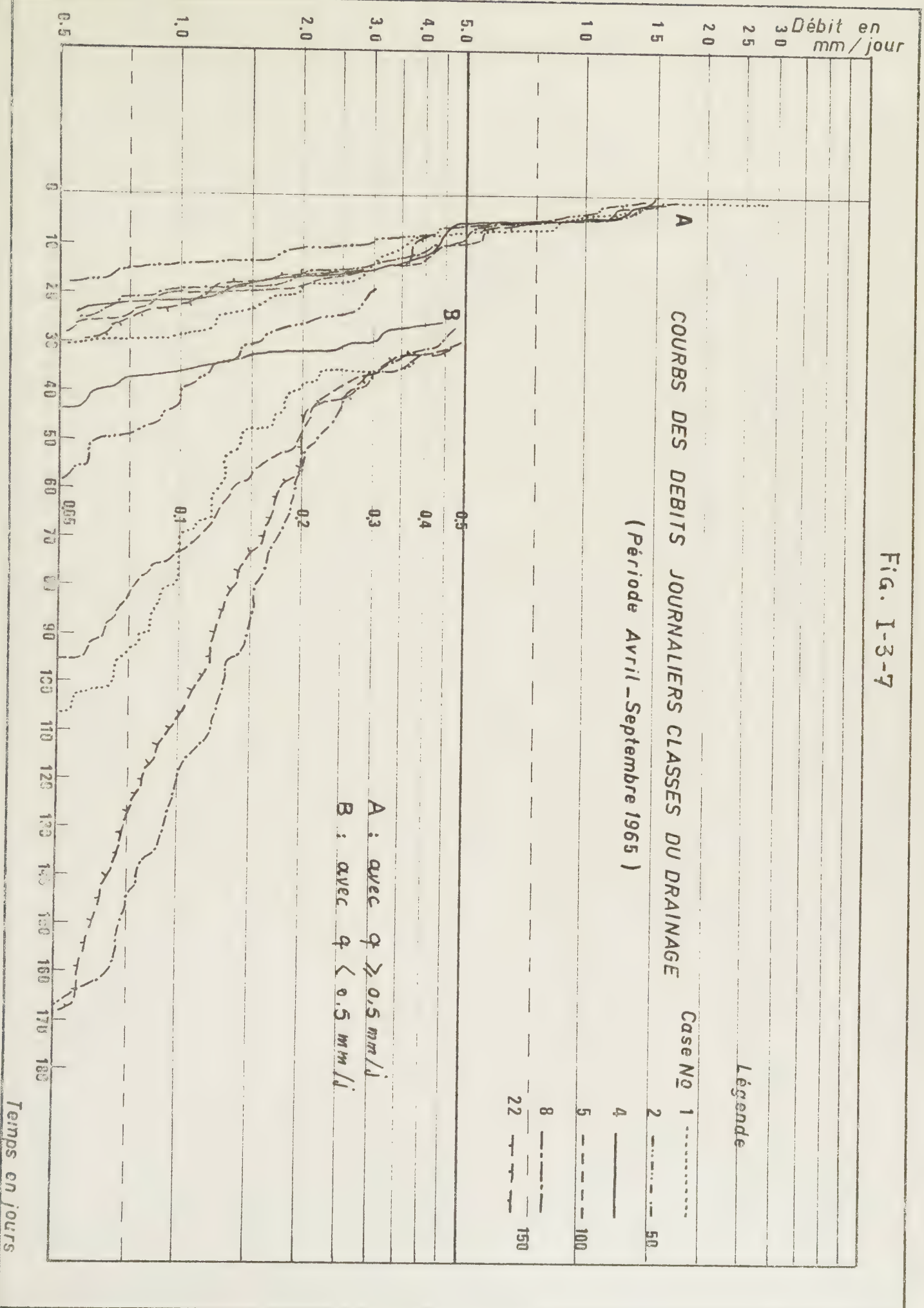
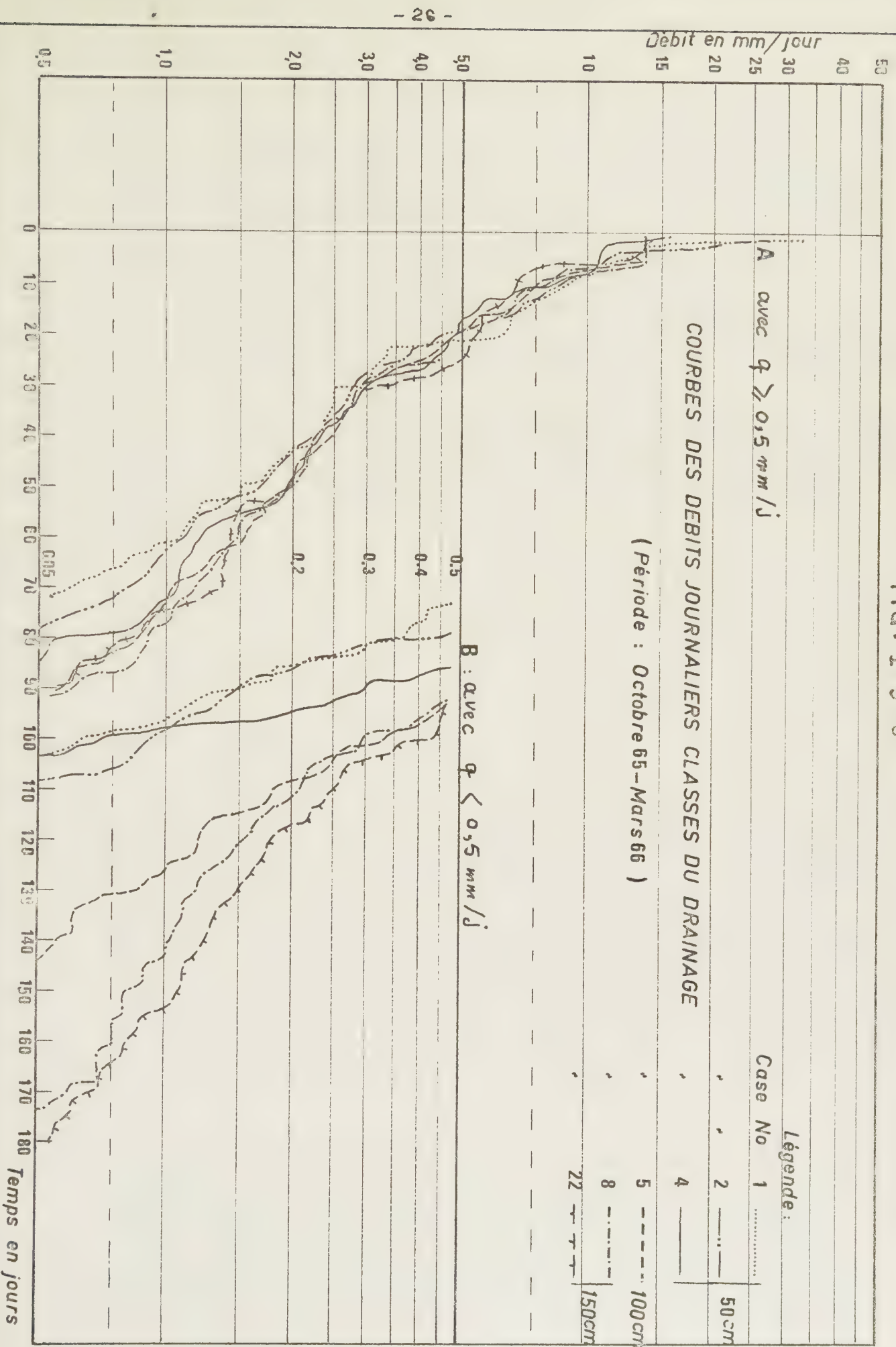


Fig. I-3-8



Nous avons ainsi porté sur quatre graphiques l'ensemble de ces courbes, six courbes pour chaque semestre représentant trois cases de 50 cm, deux cases de 150 cm et une seule case de 100 cm. Le résultat est assez satisfaisant et leur comparaison montre que les courbes des cases de 50 cm se situent de la même manière, ainsi que celles de 150 cm. La case de 100 cm a une position intermédiaire (Voir graphiques I - 3 - 5 à I - 3 - 8).

Les courbes des débits journaliers classés d'une période déterminée, présentent approximativement la forme générale et régularisée des courbes de décroissance du débit du drainage de l'ensemble des épisodes pluvieux de cette période, car les phases croissantes sont très brèves.

Ces dernières courbes dites courbes de tarissement constituent le sujet principal de notre travail, nous verrons par la suite ce que nous avons observé dans ces cas, c'est-à-dire la façon dont évoluent dans le temps les courbes de débits correspondant aux cases de différentes profondeurs.

II. - 5 - CONCLUSION -

Au cours de cette première analyse dont le but essentiel était la présentation de l'installation lysimétrique et du régime de drainage du sol nu, les résultats se présentent analogues à ceux déjà obtenus précédemment par les mêmes genres d'études effectuées dans des conditions un peu différentes des nôtres. A Rothamsted, en Grande-Bretagne, trois lysimètres monolithes avec sol nu, les profondeurs étant respectivement de 50, 100 et 150 cm, installés depuis 1881, ont été sujets de différents travaux. Ces trois cases n'ont pas montré de différences importantes en ce qui concerne la quantité totale du drainage. Nous avons vu également à plusieurs reprises que pour de longues périodes, l'épaisseur du sol n'influence pas beaucoup le drainage total. D'autres observations peuvent être soulignées.

1) Le drainage moyen annuel a été d'à peu près la moitié des précipitations moyennes annuelles. Ainsi, pendant la période de avril 1956 à Mars 1969 : les valeurs correspondantes de la pluviométrie moyenne et du drainage moyen de trois cases sont respectivement 630,5 et 325 mm, ce qui donne une évaporation de 305 mm environ. D'après les observations sur les anciennes cases lysimétriques de Versailles par E. M. Bastisse (1951) pour une moyenne pluviométrique

annuelle de 594,0 mm, l'évaporation était d'environ 364 mm et le drainage de 230 mm.

2) A pluviométrie presque égale, le drainage pendant les périodes hivernales est beaucoup plus important que pendant les périodes chaudes. D'après les résultats obtenus, le drainage moyen d'"avril à septembre" (tableau II - 3) est presque un quart du drainage moyen de "Octobre à mars".

3) La fraction des précipitations mensuelles drainées varie d'un mois à l'autre. Nous avons vu que cela atteint et même dépasse 100 % de la pluie mensuelle pendant les mois de décembre et de janvier. Par exemple, la case de 150 cm a drainé en moyenne 55,9 mm au mois de janvier avec 53,7 mm de pluie, et 5,9 mm seulement au mois de juin avec presque la même moyenne pluviométrique (52,2 mm).

4) La profondeur de la couche traversée qui ne modifie guère le drainage sur une période assez longue, n'est pas sans influence sur le drainage des périodes courtes et pendant les différentes saisons de l'année. Son intervention est marquée surtout à la fin du drainage ou pendant la saison chaude où le débit tombe à un certain seuil au-dessous duquel les cases profondes, 1 m 50 de terre ont un drainage plus élevé que les cases peu profondes.

C'est ce dernier résultat qui ressort essentiellement de cette partie du travail. Il a été bien mis en évidence par l'étude des courbes des débits journaliers classés, méthode qui permet de prendre en compte tous les drainages journaliers qui se sont produits pendant un intervalle de temps quelconque, et de faire simplement des comparaisons quantitatives entre ces drainages. Dans la partie suivante, on examinera l'évolution effective du drainage dans le temps au cours de certains "épisodes sélectionnés", nous serons plus près du déroulement réel d'un phénomène; par contre, la critique des résultats sera plus délicate, nous pourrions alors nous appuyer sur ce qui vient d'être établi: les cases profondes drainent, au cours des périodes où leurs débits sont faibles, des quantités d'eau nettement supérieures à celles que drainent les cases peu profondes lorsque celles-ci ont de faibles débits.

III. - ETUDE DES HYDROGRAMMES DU DRAINAGE

(épisodes sélectionnés)

III - 1 - GENERALITES -

Nous appellerons "tarissement d'une couche de sol", la décroissance, après une période de pluie, des débits du drainage de cette couche, en l'absence de nouvelles précipitations. Cette expression a été empruntée à la définition de la courbe de tarissement des cours d'eau, c'est-à-dire la vidange des réserves régulatrices de ceux-ci durant la ou les saisons sèches, ou encore ce qu'on appelle le régime non influencé. Nous utilisons ce terme bien qu'ici le phénomène à étudier ne corresponde pas exactement à celui des cours d'eau.

Etant donné les faibles dimensions d'une case lysimétrique choisie comme instrument de la présente étude du tarissement du sol, par rapport à une nappe régulatrice d'une rivière, on observe au cours d'une année, plusieurs charges et décharges à la suite des pluies qui se succèdent et qui alimentent ces petites réserves. Le drainage se produit à partir de chaque pluie suffisamment importante et continue après l'arrêt de celle-ci jusqu'à ce que l'eau emmagasinée dans le sol et échappant à l'évaporation et aux forces de rétention du sol soit ainsi drainée. Le débit du drainage est ainsi en croissance, au départ après la chute de pluie, ensuite, il décroît pour finalement devenir presque inexistant ; on observe donc une variation du débit du drainage ayant quelque analogie avec celle du débit d'une rivière après une chute de pluie ou des averses ; dans le cas de la rivière, il se produit une croissance rapide du débit (courbe de crue), un débit maximum ou débit de pointe, suivi d'une décroissance relativement rapide ou décrue, après l'arrêt des précipitations ; les eaux de ruissellement ainsi écoulées, l'écoulement hypodermique et la vidange de la nappe constituent la dernière partie de l'hydrogramme de ruissellement. Dans le cas des lysimètres, il n'y a pas de ruissellement superficiel, mais il apparaît parfois à la suite de pluies très intenses, un plan d'eau à la surface.

La façon dont se déroule l'évolution du débit dépend a priori de la forme et de l'intensité de la pluie et du comportement du sol ; une pluie suffisamment intense et prolongée devrait permettre d'atteindre un débit plafond approximativement constant et caractéristique de la perméabilité du sol, mais nous n'avons pas eu l'occasion d'observer ce phénomène, bien que dans certains cas il ait drainé jusqu'à 3 mm d'eau en une heure.

Définition des épisodes sélectionnés

Afin de pouvoir analyser l'évolution du débit du drainage, dans toutes ses phases, et en particulier, d'observer la décroissance pendant un temps suffisamment long, il faut que soient remplies les conditions suivantes :

a) Une pluie abondante qui provoque un drainage assez important, soit au moins 3 mm en un jour.

b) Une période du tarissement qui suit cette précipitation. Cette période doit durer assez longtemps sans être troublée par de nouvelles pluies pour permettre de suivre le drainage dû à la pluie précédente et son évolution dans le temps, jusqu'à des débits inférieurs à 0,1 mm par jour.

Comme nous venons de le dire, le drainage dans des cases lysimétriques qui n'ont que 2 m² de surface et quelques 2 ou 3 m³ de terre, est très influencé par la pluviométrie de telle manière qu'à la suite de chaque pluie importante, le débit du drainage subit des variations plus ou moins sensibles. Il a paru donc indispensable de chercher tout au long de la durée d'observation où les volumes drainés pendant 24 heures ont été mesurés, à sélectionner certains épisodes qui s'adaptent mieux aux conditions exigées. On trouve difficilement des cas satisfaisants ; dans la recherche de ces cas, l'intervention de pluies parasites, susceptibles de troubler le phénomène étudié, a été abordée de la façon suivante :

a) Nous avons toléré l'occurrence de petites pluies qui n'ont pas provoqué de remontée notable du drainage (voir en III et en III - 3 quelques précisions à ce sujet), on a admis qu'il n'y avait pas de "remontée notable" du drainage sous l'influence des petites pluies tombées en cours de tarissement tant que le drainage d'un jour quelconque ne dépassait pas de plus de 0,1 mm le plus faible des drainages journaliers antérieurs appartenant au même épisode de tarissement ; on a bien sûr vérifié que pendant les périodes sans pluie les données utilisées ne présentent jamais de remontées des drainages journaliers qui soit supérieure à 0,1 mm.

b) Des pluies plus importantes mais isolées, c'est-à-dire suivies par une période de sécheresse qui interrompent la courbe de tarissement antérieure seront elles-mêmes à l'origine d'un nouvel épisode de drainage. Nous obtiendrons alors deux épisodes de drainage successifs, séparés par la remontée du drainage.

Nous allons d'abord présenter les observations sous forme de tableaux et de graphiques ; ensuite viendra l'étude de ces résultats, au cours de laquelle nous avons essayé d'ajuster les courbes observées à des formules mathématiques afin de rendre plus facile leur comparaison. Nous verrons au fur et à mesure, et ce, bien entendu, dès le début, s'il apparaît certaines différences entre les trois cases de 50, 100 et 150 cm que nous avons choisies pour examiner l'effet de la profondeur (d'après l'étude précédente, portant sur les courbes de débits journaliers classés, de telles différences doivent apparaître).

N.B. - Il faut rappeler que les périodes de gel et de dégel ont été exclues de cette étude.

III. - 2 Analyse des débits d'après les mesures journalières, étude de ----- quelques cas caractéristiques -----

Il s'agit donc d'analyser quelques épisodes de tarissement sélectionnés.

Nous avons divisé ces épisodes en deux catégories, suivant qu'ils se sont produits pendant la saison chaude ou froide (les périodes dites ici "saison chaude" et "saison froide" sont en réalité les six mois d'avril à septembre, dont les jours sont plus longs que les nuits, et les six autres dont les jours sont plus courts ; cette division coïncide avec le classement selon les valeurs mensuelles de l'évapo-transpiration potentielle).

III - 2 - 1 Ci-après, voici tout d'abord quelques épisodes choisis pendant les mois chauds.

Cas N° 1 - Avril - Mai 1959 -

La pluviométrie qui a provoqué ce premier épisode est présentée dans le tableau III - 1 :

Tableau III - 1

Pluviométrie de la Station du C.N.R.A.
(Avril 1959)

Date	Pluie (mm)	Durée (heures)	Intensité (mm/h)
25 Avril 1959	1,3	3,8	0,34
26 " "	6,2	11,7	0,53
27 " "	1,5	3,3	0,45
28 " "	2,4	4,6	0,52
29 " "	12,3	13,3	0,93
30 " "	11,3	18,5	0,61
Total	35,0	55,2	0,63

Il y a eu donc au total 35 mm de pluie durant 6 jours, et répartis sur 55,2 heures, ce qui correspond à une intensité moyenne de 0,63 mm/h. Mais la majeure partie de ces précipitations (23,6 mm, soit 70 % du total) est tombée le 29 et le 30 avril. A partir de cette date, on observe une période sans pluie qui dure 18 jours. Le débit du drainage était tombé à son minimum le 28 avril à la suite des pluies précédentes (0,05, 0,25 et 0,18 mm/j respectivement pour les cases de 50, 100 et 150 cm).

Le tableau III - 2 présente les drainages journaliers en mm de trois cases lysimétriques, au cours de la période considérée. Les précipitations survenues pendant la période de vidange sont également présentées.

Les hydrogrammes correspondants sont figurés sur le graphique I - 4 - 1, la pluie est schématisée par des traits verticaux.

Le graphique I - 4 - 1 montre la variation du débit du drainage journalier qui constitue ce que nous nommons l'hydrogramme de drainage.

Pour le cas présent, on voit que :

- le drainage étant à son minimum à la suite des pluies précédentes, commence à croître rapidement après le 29 avril, alors que la pluie avait mis fin à la période sèche précédente le 25 avril (total de précipitations du 25 au 28 : 11,4 mm, le 29 : 12,3 mm).

Tableau III-2 - Drainages journaliers des casos
lysimétriques en mm.

Date	P mm	C 4 50 cm	C 5 100 cm	C 8 150 cm	Date	P mm	C 4 50 cm	C 5 100 cm	C 8 150 cm
8/4/59	2,4	0,05	0,25	0,18	16/5/59		0,05	0,20	0,16
9/4/59	12,3	0,05	0,28	0,17	17/5/59		0,04	0,20	0,16
10/4/59	11,3	7,60	5,57	1,78	18/5/59	1,3	0,02	0,14	0,16
11/5/59		8,90	9,50	8,00	19/5/59	5,5	0,02	0,12	0,16
12/5/59	1,0	2,10	2,20	2,20	20/5/59	2,6	0,06	0,15	0,13
13/5/59		0,53	0,80	0,95	21/5/59	5,9	0,07	0,12	0,12
14/5/59		0,30	0,60	0,70	22/5/59	0,3	0,05	0,10	0,09
15/5/59		0,15	0,43	0,37	23/5/59		0,04	0,09	0,08
16/5/59		0,08	0,36	0,29	24/5/59		0,03	0,08	0,09
17/5/59		0,06	0,35	0,28	25/5/59		0,03	0,08	0,09
18/5/59		0,04	0,34	0,28	26/5/59		0,07	0,13	0,11
19/5/59	0,8	0,03	0,31	0,28	27/5/59		0,02	0,07	0,04
20/5/59		0,04	0,27	0,23	28/5/59		0,01	0,07	0,03
21/5/59		0,04	0,27	0,23	29/5/59		0,01	0,04	0,02
22/5/59		0,05	0,24	0,17	30/5/59		0,01	0,04	0,02
23/5/59		0,05	0,23	0,17	31/5/59		0,005	0,04	0,02
24/5/59		0,05	0,23	0,18	1/6/59		0,005	0,02	0,015
25/5/59		0,05	0,20	0,16	2/6/59		0,005	0,02	0,015

*

.../...

FIG. I-4-1

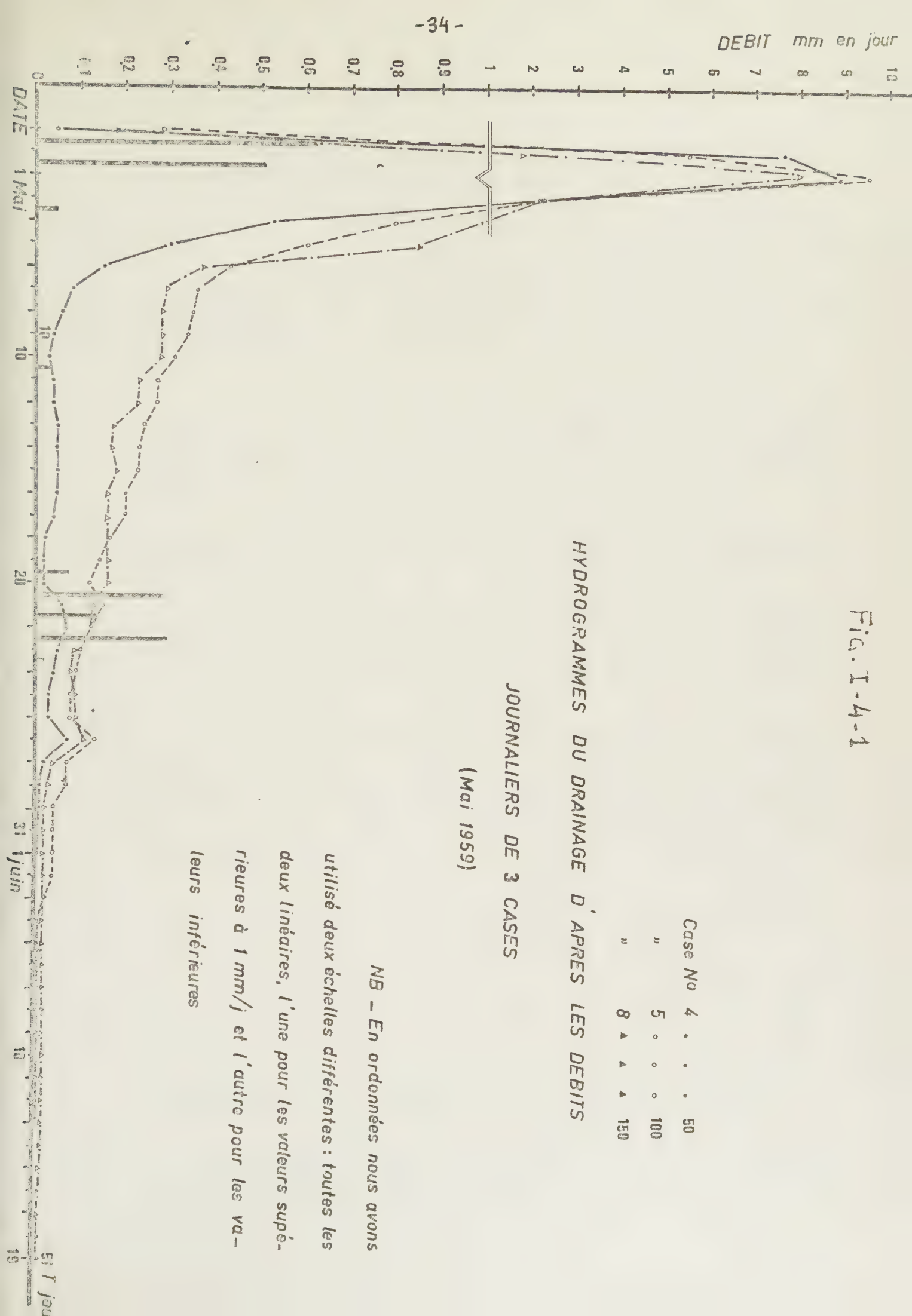
Case No	4	.	.	.	50
"	5	o	o	o	100
"	8	Δ	Δ	Δ	150

HYDROGRAMMES DU DRAINAGE D'APRES LES DEBITS

JOURNALIERS DE 3 CASES

(Mai 1959)

NB - En ordonnées nous avons
utilisé deux échelles différentes : toutes les
deux linéaires, l'une pour les valeurs supé-
rieures à 1 mm/j et l'autre pour les va-
leurs inférieures



- à partir de cette dernière date, le débit du drainage croît très vite depuis une fraction de mm jusqu'à 9 à 10 mm par jour.

Le drainage atteint son maximum le 1er mai (entre 30 avril et 1er mai 9 h - 9 h) après l'arrêt total des précipitations le 30 avril.

- le débit du drainage baisse très rapidement pendant les 2 à 4 premiers jours après la pluie ; la pente de la courbe descendante devient de plus en plus faible (c'est-à-dire qu'après avoir eu de fortes valeurs négatives, elle se rapproche de zéro) jusqu'à l'épuisement approximatif de l'eau drainable.

Cette période de diminution progressive du débit pour le cas présent s'étend à 1 mois environ. Il est évident que l'allure de chacune des parties expliquées ci-dessus est liée à certaines caractéristiques, telles que la pluie et son intensité, la surface, l'épaisseur et la capacité d'infiltration ou la perméabilité du terrain à étudier, etc...

Nous comparons les résultats de trois cases de différentes profondeurs, ayant considéré les autres conditions plus ou moins identiques :

- le débit de la case de 50 cm dans le cas présent, croît plus rapidement que les deux autres ; le débit maximum observé dans cet exemple sur un jour s'est présenté avec la case de 100 cm ou case de profondeur moyenne, mais dans la majorité des cas étudiés, c'est avec la case de 50 cm que cela se produit.

- La décroissance du débit elle aussi est plus rapide dans la case moins profonde, nous verrons plus tard que, durant les trois ou quatre premiers jours du drainage après la pluie, il n'est pas facile de distinguer une relation entre le débit du drainage et l'épaisseur du sol. Mais à partir de là, les variations des débits prennent une forme plus régulière et la différence des débits journaliers entre les trois cases est plus nette.

- Le tarissement complet se produit tout d'abord dans la case moins profonde, le drainage se poursuit plus longtemps dans la case moyenne et plus encore dans la plus profonde.

- Une pluie de 1 mm survenue le 2 mai n'a aucun effet visible sur la forme des courbes en décroissance rapide, alors que la pluie de 0,8 mm sur 20 minutes du 9 mai fait croître sensiblement le débit du drainage de la case moins profonde sans être remarquée dans les deux autres. De même, les précipitations du 18 au 22 mai semblent ne pas avoir modifié le drainage des cases profondes, tandis que l'on aperçoit une augmentation relativement forte pour la case de 50 cm.

- Les quantités totales de drainage ont été calculées pour les trois cases pendant la durée de ce premier cas. Elles sont : présentées dans le tableau III - 3. La période a été divisée en trois sous-périodes séparées par de petites quantités de pluie.

Tableau III - 3

Hauteur totale du drainage en mm

Sous-période	C. 4 50 cm	C. 5 100 cm	C. 8 150 cm
30 Avril	7 → 60	5 → 57	1 → 78
1 - 19 Mai	12 → 56	16 → 80	15 → 12
20 Mai - fin	9 → 59	1 → 13	1 → 42
Total	20 → 75	23 → 50	18 → 32

La comparaison montre que la case profonde a drainé en quantité totale moins que les autres ; par contre, la case de 100 cm donne un maximum, la différence est marquée notamment sur les premiers jours du drainage où la case de 150 cm a drainé moins d'un quart de la case de 50 et presque un tiers de celle de 100 cm. Une partie de cette différence est compensée les deux jours suivants, il s'agit d'un retard se produisant sur le délai de réponse dans celle-ci.

- Les courbes de hauteurs de drainages cumulés ont été établies pour chaque case. Elles donnent en ordonnées, pour chaque instant, l'intégrale :

$$Dr = \int_{t_0}^t q. dt$$

Dr représente la hauteur totale du drainage depuis le temps $t = 0$ choisi comme origine de commencement du drainage. A chaque point la pente de la tangente à la courbe donne le taux instantané "q" du drainage. Nous ferons plus tard une comparaison entre les courbes concernant plusieurs cas étudiés, pour voir si cette répartition en pourcentage en fonction du temps reste analogue pour une même case.

La figure I - 5 présente une superposition de ces courbes du drainage cumulé de trois cases. Les valeurs numériques correspondantes sont présentées dans le tableau III - 4.

FIG. I-5

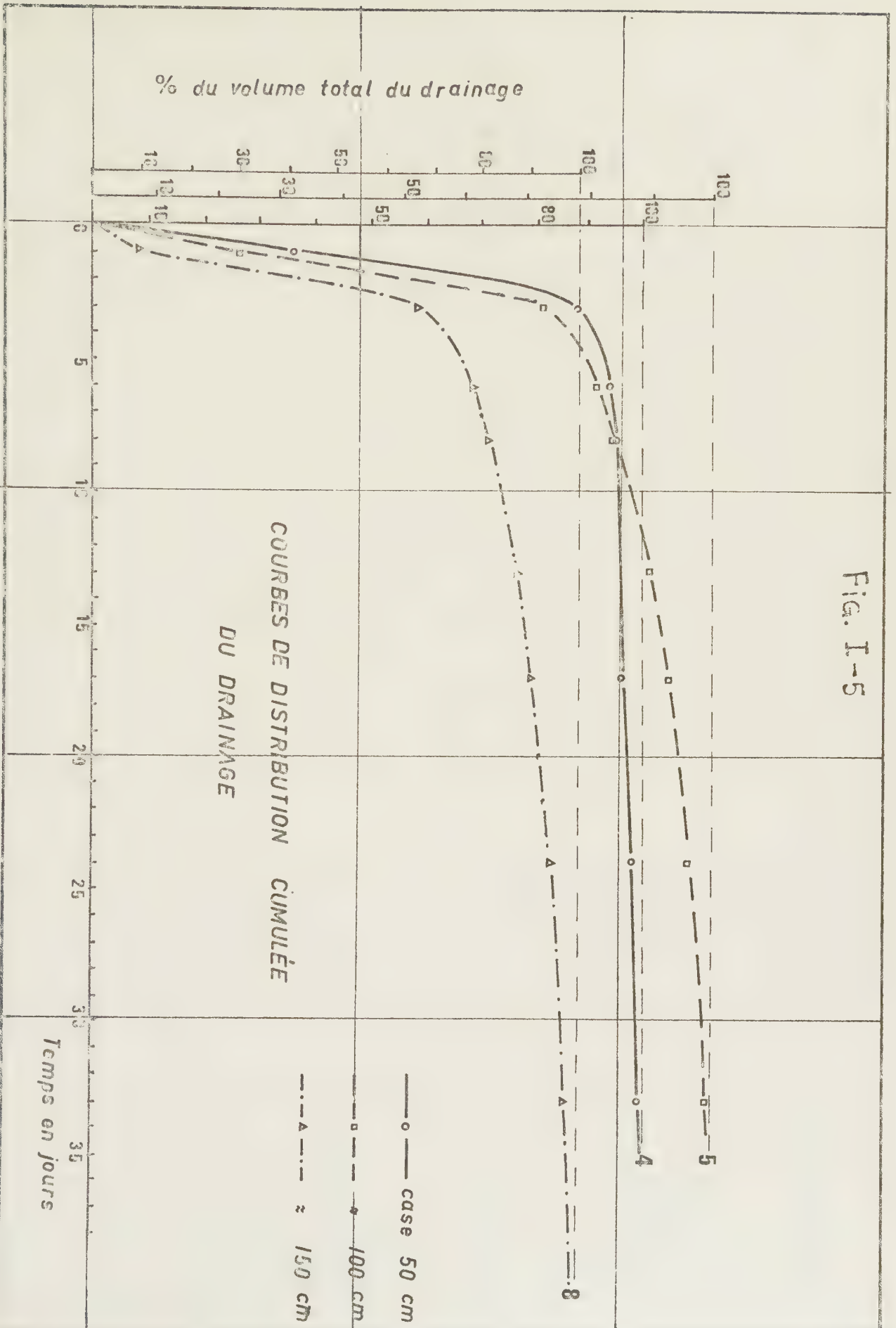


Tableau III - 4

% de drainages cumulés des lysimètres
(50, 100 et 150 cm) (30 avril - fin mai 1959)

N. de jours du drainage	C. 4 50 cm	C. 5 100 cm	C. 8 150 cm
1	36,62	23,70	9,87
3	89,58	72,84	66,40
6	94,30	80,62	77,50
8	94,97	83,64	80,70
13	-	89,72	87,20
17	96,84	93,07	91,10
24	98,18	96,81	95,60
33	99,09	99,19	97,40
35	100,0		
43		100,0	
72			100,0

La figure I - 5 montre la répartition du drainage dans le temps qui varie d'une case à l'autre. Par exemple sur le graphique, pour un t donné en abscisse, il y a trois valeurs correspondantes sur l'axe des ordonnées, ainsi pour $t = 3$, nous obtenons les valeurs de 90 %, 73 % et 65 % respectivement pour les cases 50, 100 et 150 cm. Cela montre une fois de plus l'effet régularisateur de l'épaisseur du sol pour l'évacuation de l'eau gravitaire de la couche drainante.

Nous avons suivi de la même façon d'autres épisodes de tarissement qui se sont produits durant les mois chauds de l'année :

- | | | | |
|---------------------|----|--------------|------|
| 1. - du 6 Juin | au | 16 Juillet | 1961 |
| 2. - du 27 Juillet | au | 20 Septembre | 1961 |
| 3. - du 3 Avril | au | 5 Mars | 1962 |
| 4. - du 2 Août | au | 30 Septembre | 1963 |
| 5. - du 31 Juillet | au | 25 Août | 1965 |
| 6. - du 3 Septembre | au | 15 Novembre | 1965 |
| 7. - du 18 Juillet | au | 12 Août | 1966 |

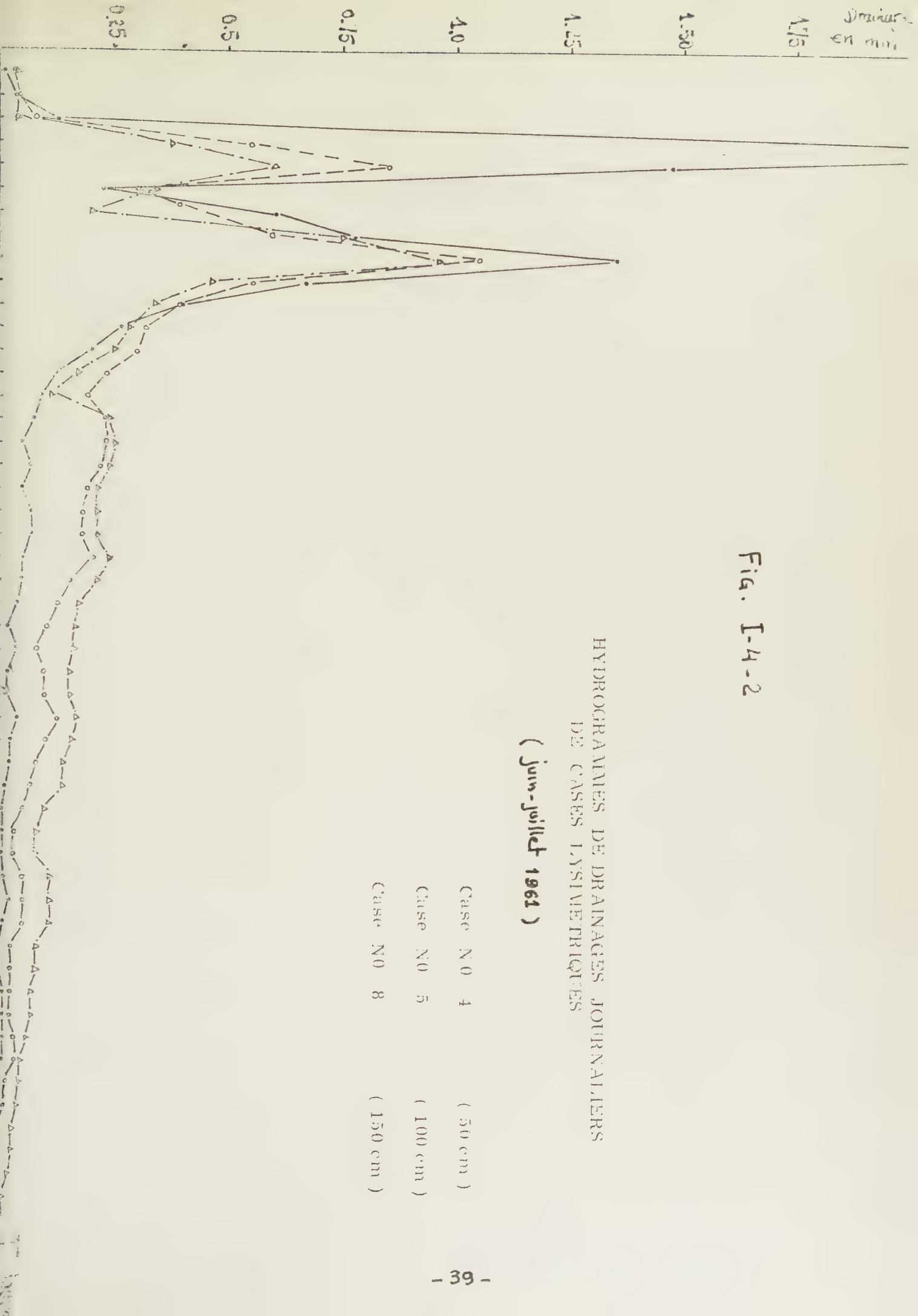


Fig. I-4-3

VARIATION DE DÉBITS JOURNALIERS DU DRAINAGE DE
 CASES LYSIMÉTRIQUES EN FONCTION DU TEMPS
 (du 7 Février au 31 Mars 1961)

Case NO 4 (50 cm)
 Case NO 5 (100 cm)
 Case NO 8 (150 cm)

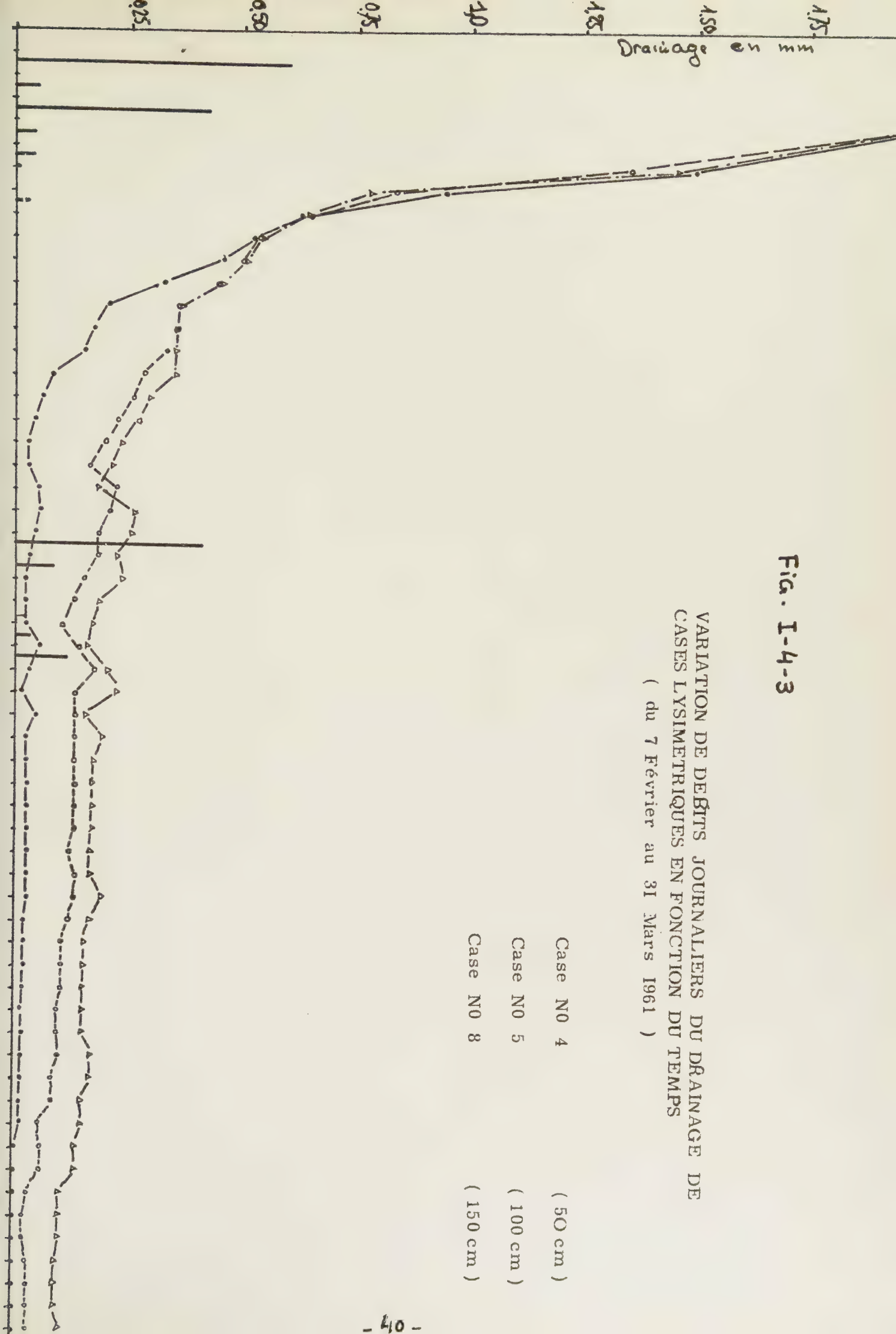


Fig. I-4-4

HYDROGRAMMES DE DRAINAGES JOURNALIERS
DE CASES TYSIMETRIQUES
(juillet- Août 1961)

Case NO 4	(50 cm)
Case NO 5	(100 cm)
Case NO 8	(150 cm)

Nous avons établi pour chacun de ces épisodes les hydrogrammes qui correspondent aux trois cases de 50, 100 et 150 cm de profondeur. Parmi ces cas, on trouve quelques-uns qui sont divisés par deux ou trois périodes pluvieuses qui se sont succédées. Ils nous fournissent alors autant de courbes de tarissement à condition que les périodes de pluie soient, bien entendu, assez éloignées l'une de l'autre. L'examen des hydrogrammes correspondant aux cas sélectionnés ci-dessus montre que :

1) - Suivant la règle générale, après chaque pluie et suivant sa quantité totale et son intensité, le drainage se met à croître après le temps nécessaire pour l'imbibition et l'infiltration. Nous verrons plus tard que cette croissance se produit en général d'abord dans la case la moins profonde ; limitant ici l'étude à des données mesurées toutes les 24 heures, il n'est pas facile de mettre en évidence ce phénomène.

2) - La décroissance du débit des drainages journaliers est très rapide, pendant les 2 à 4 premiers jours, puis elle devient de plus en plus lente.

3) - Dans la phase suivante, la courbe correspondant à la case de 50 cm descend plus rapidement que les deux autres ; le tarissement s'effectue donc d'abord dans celle-ci, et puis respectivement dans celles de 100 et de 150 cm. On retrouve donc ici le résultat obtenu dans l'étude des courbes de débits journaliers classés. Nous parlerons plus tard, après avoir ajusté les différentes courbes à des formules pour exprimer l'ordre de grandeur de l'effet de la profondeur sur le temps nécessaire pour qu'un sol libre la quasi-totalité de l'eau drainable qu'il contient.

Nous présentons dans le tableau III - 5 - 1 pour chacun des cas sélectionnés pendant les mois chauds de l'année, la hauteur de pluie survenue tout au long de la période considérée et les hauteurs totales de drainage, ainsi que le nombre de jours du drainage pour les trois cases.

Le nombre de jours de drainage pour les deux cases profondes peut être bien supérieur aux valeurs indiquées dans le tableau III - 5 - 1. Ces valeurs montrent seulement la durée de périodes pratiquement sans pluie entre deux pluies successives importantes.

III. - 2 - 2 - Cas sélectionnés pendant la saison froide

Nous avons vu au cours de l'étude des courbes des débits classés de drainage, que pendant la saison froide, une très grande partie des précipitations s'infiltra dans le sol, le pouvoir évaporant de l'atmosphère étant faible en hiver. Le sol reste plus humide qu'en été, il est donc rare qu'une pluie, même faible, ne provoque pas une remontée du débit de drainage ; en général, le tarissement ne peut pas être suivi sur une longue période.

Numéros	Date	50 cm		100 cm		150 cm		P mm
		N. j. dr.	Drainage	N. j. dr.	Drainage	N. j. dr.	Drainage	
1	6.06.61	40	9,85	40 + (a)	8,61	40 +	9,14	65,0
2	27.07.61	19	6,78	31	6,93	55	7,68	56,0
3	3.04.62	33	24,35	33 +	25,70	33 +	27,37	68,0
4	2.08.63	46	48,6	52	54,2	60	57,0	168,0
5	31.07.65	20	39,8	27	43,2	31	44,0	139,6
6	3.09.65	32	77,7	50	81,9	72	83,0	195,6
7	18.07.66	13	28,2	23	37,2	23	36,5	88,4

Tableau III - 5 - 1

Drainage et pluviométrie durant les périodes sélectionnées parmi les mois chauds

(a) le signe + devant les chiffres exprime que le tarissement a été interrompu par un nouvel épisode du drainage

Voici ci-dessous quelques épisodes que nous avons choisis parmi les données journalières présentant ainsi une période de tarissement :

1. - du 28 Janvier	au 8 Avril	1961
2. - du 12 Décembre	au 30 Décembre	1961
3. - du 5 Février	au 3 Mars	1962
4. - du 4 Novembre	au 10 Décembre	1962
5. - du 19 Novembre	au 5 Décembre	1963
6. - du 1 Février	au 3 Mars	1965

Les hydrogrammes du drainage ont été établis pour chacun des cas ci-dessus. Nous trouvons également ici des cas possédant 2 ou 3 épisodes de drainage et de débit de tarissement successifs dus aux pluies intervenant en cours de tarissement.

Le tableau III - 5 - 2 présente le drainage total et la pluviométrie au cours de chaque cas ainsi que la durée approximative des épisodes étudiés.

III. - 2 - 3 Conclusions sur les cas sélectionnés de "saison chaude" et de "saison froide"

L'examen d'un certain nombre de cas, ainsi choisis parmi soit les données des mois froids, soit celles des périodes chaudes de l'année nous permet au moins de voir la forme de variation de débit du drainage d'une couche de sol nu et désigner en plus les différentes composantes de la courbe représentant ces variations que nous avons appelé "l'hydrogramme du drainage". Nous avons vu que cela ressemble par sa forme à celle qu'on observe à l'exutoire d'un bassin versant après une averse isolée. Nous avons ensuite suivi ces variations dans des couches de sol ayant les profondeurs différentes. Bien que le manque de précision sur les données journalières ne permette pas de mettre en évidence l'hypothèse suivant laquelle il y aurait une certaine différence de forme des hydrogrammes du drainage de ces couches drainantes ; nous avons vu au moins pour la partie descendante de celle-ci (qui est le sujet même de notre étude), une tendance à ne pas se manifester de la même façon pour les couches du sol d'épaisseurs différentes. C'est dire que le drainage ayant atteint un maximum, en l'absence de nouvelles alimentations, la décroissance est très rapide, le taux de variation de volume de drainage d'un jour à l'autre atteint même de 1 à 1/10 au cours de 24 heures, par exemple, la case de 150 cm a drainé 22,8 mm d'eau le 7 août 1963 à la suite de 49,8 mm de pluie survenue le jour précédent, tandis que le 8 août c'est-à-dire un jour après la quantité d'eau recueillie pour cette même case ne dépassait pas de 2,25 mm. De même, les cases 100 cm et 50 cm passaient respectivement pendant ces 2 jours de 21,65 à 3,05 mm et de 20,4 à 3,05 mm.

Tableau III - 5 - 2

Cas No.	Date	50 cm		100 cm		150 cm		Pluie mm
		Nombre de jours de drainage	Drainage mm	Nombre de jours de drainage	Drainage mm	Nombre de jours de drainage	Drainage mm	
1	28.01.61	53	44,85	71	47,44	71	50,35	57,20
2	12.12.61	18 +	11,3	18 +	12,5	18 +	13,1	
3	5.02.62	25 +	21,5	25 +	22,7	25 +	23,8	51,3
4	4.11.62	37 +	77,9	37 +	75,3	37 +	73,3	
5	19.11.63	14	27,22	16	30,44	18	31,80	36,8
6	1.02.65	22	33,20	29	41,90	33	43,00	44,7

Drainage et pluviométrie durant les périodes sélectionnées parmi les mois froids

Mais la durée de ces fortes variations est assez courte par rapport à la durée totale nécessaire pour que le drainage cesse. On observe seulement pendant un ou deux jours une telle descente, à partir de ce moment, les variations de l'intensité du drainage d'un jour à l'autre sont de plus en plus faibles et d'autant plus faibles que le sol est plus profond. C'est dire que les courbes descendantes du débit qui ont pendant les premiers jours une forme confuse qui rend très difficile leur comparaison, peuvent être assez bien distinguées l'une de l'autre à partir de ce moment ; car normalement sur l'axe des abscisses à un instant donné, le débit plus élevé correspond à la couche drainante plus épaisse. Le drainage s'arrête tout d'abord dans la couche moins profonde et ensuite dans celle de moyenne profondeur et finalement dans la plus profonde.

Voici quelques indications quantitatives plus précises sur la décroissance des drainages après la pluie :

Il faut d'abord rappeler qu'en étudiant les débits journaliers classés, nous avons constaté que dans les exemples traités (tableaux II - 4 - 3 et II - 4 - 4), le drainage fourni par les jours dont le débit est inférieur à 0,5 mm par jour est de l'ordre d'une quarantaine de mm par an pour les cases de 150 cm de profondeur et inférieur à cette valeur pour les autres cases ; si maintenant on envisage les jours où le débit est inférieur à 0,15 mm par jour, on tombe à une contribution annuelle qui est de l'ordre de grandeur de la dizaine de mm, soit quelques p. 100 du drainage annuel (par exemple, 1 à 4 %).

Examinons donc maintenant comment se situent les courbes de tarissement par rapport à ces débits de 0,5 mm par jour et 0,15 mm par jour :

Sur les épisodes sélectionnés, nous avons calculé pour quelques cas caractéristiques (absence de pluie pendant le tarissement), le nombre de jours de drainage ainsi que la hauteur totale drainée avec le débit de drainage supérieur à 0,5 mm par jour - entre 0,5 et 0,15 mm par jour et inférieur à 0,15 mm par jour : ces résultats se trouvent sur le tableau III - 6 ; on note que 2 à 4 jours après la fin de la pluie, le drainage tombe en-dessous de 0,5 mm par jour, c'est-à-dire à un débit déjà faible (contribution au drainage annuel peu supérieure à 10 p. 100) encore 2 à 4 jours plus tard, le drainage de la case de 50 cm est devenu inférieur à 0,15 mm par jour, ce qui, à bien des égards, est négligeable, alors que cette phase dure souvent une dizaine de jours pour la case de 100 cm et plus pour celle de 150 cm.

Date initiale	Classe de q mm/j.	Case 4			Case 5		Case 8	
		Fin Pluie	Nombre Jours	Drainage mm	Nombre Jours	Drainage mm	Nombre Jours	Drainage mm
11.12.61	q $\geq$ 0,5	13.12	7	18,42	7	18,20	7	18,94
	0,5 > q $\geq$ 0,15		3	0,73	10	2,54	12	2,70
	q < 0,15		9	0,39	2	0,25	-	-
12.06.61	q $\geq$ 0,5	13.06	4	3,38	4	2,69	3	2,20
	0,5 > q $\geq$ 0,15		3	0,86	13	3,01	22	3,71
	q < 0,15		28	1,04	18	1,32	10	1,00
17.04.62	q $\geq$ 0,5	18.04	4	5,11	5	5,40	5	5,90
	0,5 > q $\geq$ 0,15		4	0,85	10	2,82	13	4,00
	q < 0,15		10	0,65	4	0,23	1	0,10
29.07.61	q $\geq$ 0,5	28.07	1	5,56	1	4,42	1	3,64
	0,5 > q $\geq$ 0,15		2	0,71	5	1,02	11	1,77
	q < 0,15		14	0,46	24	1,50	30	1,88
30.09.65	q $\geq$ 0,5	2.10	6	27,93	6	26,61	6	27,90
	0,5 > q $\geq$ 0,15		1	0,19	6	1,58	8	2,13
	q < 0,15		6	0,36	19	0,64	20	1,78

Tableau III - 6

Nombre de jours de drainage et le drainage total pour les différentes classes de débits

Avant d'effectuer une comparaison plus détaillée des différentes parties de l'hydrogramme de drainage, nous examinerons les données obtenues par les appareils enregistreurs pour se rendre compte également des variations du débit qui peuvent survenir au cours de 24 heures. Nous aurons recours également à quelques formules mathématiques proposées pour ce genre d'études, pour faciliter notre comparaison par les moyens des chiffres et des graphiques déduits. Indiquons, d'autre part, qu'avec les appareils enregistreurs, nous étudierons plusieurs cases de 150 cm de profondeur, comme cela a été fait en II - 4 (débits journaliers classés) et non pas seulement la case 8, ce qui permettra là encore de confirmer les résultats obtenus avec la case 8.

III. - 3 Analyse des drainages recueillis par les appareils enregistreurs -
(intervalles de temps entre deux mesures souvent très inférieures à 24 heures)

III. - 3 - 1 - Généralités

A partir du mois de février 1968, trois appareils enregistreurs (pluviographe à augets basculeurs) ont été installés à l'exutoire de trois lysimètres destinés à notre étude. Le drainage a été ainsi enregistré et suivi pendant deux années (sauf interruptions intervenues par le mauvais fonctionnement des appareils). Quant à la pluviométrie, nous avons utilisé les données de la station météorologique du C.N.R.A. qui se trouve à quelques 300 mètres de notre installation. Depuis février 1968, nous possédons donc une série de courbes expérimentales de la variation du débit de drainage de trois lysimètres de différentes profondeurs à la suite des précipitations.

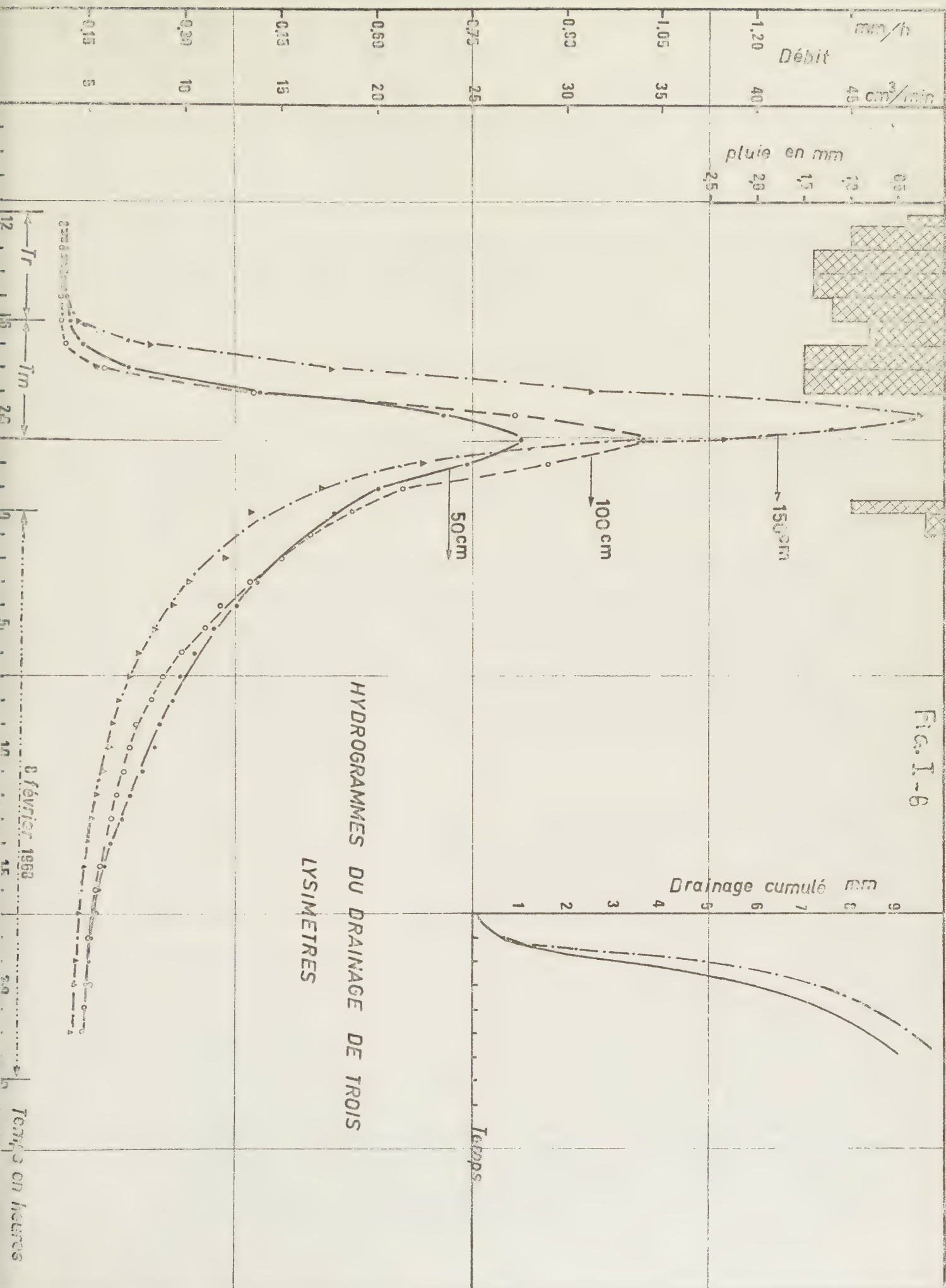
Les périodes suivantes ont été sélectionnées parmi l'ensemble des données :

1. - du 7 Février	au 14 Février	1968	Saison froide
2. - du 14 Février	au 21 Février	1968	Saison froide
3. - du 21 Février	au 21 Mars	1968	Saison froide
4. - du 21 Mars	à fin Avril	1968	Saison chaude
5. - du 1 Nov.	au 30 Novembre	1968	Saison froide
6. - du 12 Mars	au 24 Avril	1969	Saison chaude
7. - du 25 Avril	au 20 Mai	1969	Saison chaude
8. - du 24 Juin	au 10 Juillet	1969	Saison chaude

Comme dans l'étude des épisodes du drainage journalier, nous avons présenté, pour chacune des périodes ci-dessus l'hyéto-gramme de la pluie et l'hydrogramme du drainage correspondant en examinant les différentes composantes de celle-ci et en comparant les résultats de trois lysimètres. Ce choix des épisodes sélectionnés a été basé sur les mêmes règles que nous avons présentées précédemment : pluies importantes et isolées, épisode du drainage assez long pour suivre l'évolution du drainage dans le temps, etc... On aperçoit à ce sujet que la durée des épisodes (intervalle de temps entre le commencement du drainage ou sa remontée et la fin ou son interruption) est bien différente d'un épisode à l'autre. Cela varie de quelques heures pour un épisode de tarissement non complet à plus d'un mois pour les cas non interrompus par les précipitations et qui aboutissent donc à un tarissement presque complet. Cela montre que le problème des pluies parasites a été résolu, ici comme dans l'étude précédente (mesures journalières), par l'interruption de l'épisode là où la pluie fait croître le drainage de plus de 0,1 mm à partir du minimum atteint antérieurement. Mais dans certains cas, la pluie n'ayant pas provoqué d'augmentation sensible du débit, il semble qu'elle provoque une prolongation dans le temps du drainage, qui aurait un effet de retardement sur le tarissement. Cela est observé surtout vers la fin de l'épisode du drainage dans les cases profondes à partir des précipitations assez faibles.

Avant d'examiner les épisodes sélectionnés, nous avons présenté sur le graphique I - 6 un hydrogramme-type du drainage ainsi que l'hyéto-gramme correspondant. Les différentes composantes de cet hydrogramme qui peuvent être considérées en quelque sorte comme des caractéristiques hydrauliques des cases sont présentées ainsi :

t_1	l'instant de commencement de pluie
t_2	le début de réponse
t_0	l'instant du débit maximal, origine de temps pour la courbe de décroissance de débit
t_3	la fin de l'épisode étudié
T_r	Temps de réponse
T_m	Temps de montée
T_v	Temps de décroissance



Q_1 Débit initial de drainage

Q_M Débit maximal

De plus, nous avons établi des tableaux récapitulatifs qui présentent les valeurs numériques des paramètres ci-dessus pour les différents épisodes et sous-épisodes étudiés.

Description des tableaux

Pour l'ensemble des épisodes pluvieux examinés au cours de ce chapitre, un certain nombre de paramètres tirés à partir des hydrogrammes sont chiffrés et mentionnés dans les tableaux III - 8 - 1 à III - 8 - 5 ; les différentes colonnes de ces tableaux montrent respectivement :

- 1) Date : le ou les jours où les épisodes pluvieux se sont produits
- 2) Profondeur : l'épaisseur de la couche drainante des cases étudiées
- 3) Début de réponse (t_2) : il s'agit de l'instant où la remontée du débit de drainage est marquée sur les diagrammes des enregistreurs
- 4) Débit initial (Q_1) en mm/h : c'est le débit du drainage juste avant la remontée à l'instant $t_2 - 1$. Il est à peu près nul dans le cas où le sol est à la capacité au champ avant l'arrivée de pluie provoquant un épisode de drainage.

Mais, étant donné qu'en présence de pluies successives et fréquentes, il y a un régime de drainage continu, ce débit a souvent une valeur non négligeable. Cette valeur varie suivant les cas que nous avons sélectionnés de 0 à 0,2 mm/h. Etant donné que faute de mesures nous n'avons pas de connaissance de l'humidité du sol, ce débit initial est le seul facteur permettant de caractériser l'état d'humidité du sol.

- 5) Temps de réponse : nous avons défini le temps de réponse comme intervalle de temps Δt , entre $t_2 - t_1$ le commencement de la pluie et la remontée du drainage. On utilise souvent le "lag" qui est le temps compris entre les deux sommets correspondants respectivement à l'hyétoGramme de la pluie (ou le centre de gravité de celle-ci) et à l'hydrogramme du drainage. Le temps de réponse tel qu'il est défini, dépend beaucoup de l'état initial du sol en humidité et des autres facteurs tels que la granulométrie, la porosité, les matières organiques, etc ... et encore des caractéristiques de la pluie. Autrement dit, la capacité d'infiltration joue un rôle très important pour la détermination de ce temps de réponse. Nous avons calculé à partir de cela le rapport L/T_r que nous nommons vitesse de transfert de l'eau à travers la couche

drainante, L étant la profondeur de celle-ci. Cette évaluation est approximative car des fluctuations de l'ordre d'une dizaine de minutes au plus, interviennent quand il s'agit de préciser les deux extrémités de T_r (commencement de pluie et la remontée du drainage). Notons d'autre part que l'eau doit s'accumuler à la base un peu avant le drainage, ce qui accroît T_r . Nous avons présenté quelques valeurs numériques de cette "vitesse de transfert" dans le tableau III - 7. La pluviométrie ainsi que le débit initial du drainage pour chaque cas et chaque case sont également présentés, nous avons considéré le débit initial comme un élément en corrélation avec l'humidité initiale du sol.

Ces valeurs sont plus ou moins en accord avec les résultats obtenus au cours d'une étude d'infiltration au champ par la méthode de tensiomètre (A. Féodoroff, 1969), d'après laquelle, la vitesse d'infiltration dans un sol limon au long d'une dizaine de cas observés, varie de 3,10 à 8,33 cm par heure. Ces dernières valeurs intéressent, il est vrai, une couche de 25 cm de profondeur. D'après le tableau III - 7, que nous avons établi par la méthode de drainage, cette vitesse de "transfert" est plus grande suivant la profondeur croissante des cases étudiées.

Le graphique I - 7 montre la variation du temps de réponse en fonction du débit initial, les points expérimentaux relatifs à trois cases y sont présentés.

Tableau III - 7
Vitesse de "transfert" de l'eau (L/T_r)

Date	Pluie		Case 4 50 cm		Case 5 100 cm		Case 22 150 cm	
	Hauteur mm	Intensité mm/h	q_i mm/h	V_f cm/h	q_i mm/h	V_f cm/h	q_i mm/h	V_f cm/h
8.2.68	2,5	0,55	0,120	6,89	0,130	11,4	0,13	31,57
13.2.68	8,0	1,10	0,027	6,25	0,030	8,69	0,030	17,64
20.2.68	8,1	0,90	0,005	4,16	0,020	4,76	0,020	6,81
21.2.68	6,6	0,66	0,090	4,87	0,080	8,00	0,080	12,50
25.3.68	6,3	0,70	0,010	4,15	0,030	5,85	-	-
21.4.69	19,0	4,60	0,000	1,11	0,008	1,96	0,010	2,54

6) Débit maximum ou débit de pointe : les chiffres présentés dans la colonne 6 des tableaux récapitulatifs sont les valeurs de drainage observé pendant une heure et ne présentant pas le drainage maximum instantané qui peut être bien plus élevé. (Rappelons que l'enregistrement est discontinu : un basculement pour chaque écoulement de 20 ml, ce qui pour les cases de 2 m² correspond à un drainage de 0,01 mm ; les plus faibles des débits de pointe étudiés étant de l'ordre de 2 ou 3 centièmes de mm par heure, cela justifie le choix de l'heure comme plus petit intervalle de temps utilisé).

Le débit de pointe survient dans la majorité des cas, une ou deux heures après la fin de la pluie. Sa valeur varie, suivant le cas, au cours de nos observations, d'une fraction de mm à 3,3 mm/h pour la case de 150 cm, 2,25 mm/h pour celle de 100 et 1,98 mm/h pour la case de 50 cm. Les deux premiers chiffres sont observés le 1er novembre 1968 avec une pluviométrie de 24,1 mm et le troisième, le 12 mars 1969 à la suite de 12,6 mm de pluie ; le même jour, le débit maximum de la case de 100 cm était 2,2 mm qui est voisin avec le débit observé le 1er novembre par la même case.

Les débits de pointe seront introduits dans les formules des courbes de tarissement que nous présentons plus tard. Remarquons ici que les débits de pointe peuvent être utilisés pour essayer de caractériser la perméabilité des cases ; mais sous le climat de Versailles, où les pluies les plus intenses et les plus abondantes sont relativement modérées, et avec le sol utilisé, on n'observe que rarement la formation d'un plan d'eau à la surface ; nous examinons donc seulement dans cet essai, pour chacune des trois profondeurs, le plus grand des débits de pointe observés ; supposons qu'alors ces débits se produisent avec un plan d'eau. à la surface des cases :

D'après la loi de Darcy :
$$q = K S \frac{e + L}{L}$$

L étant la profondeur de la couche du sol, ici égale à 1 mètre.

Nous prenons $\frac{e + L}{L}$ c'est-à-dire la charge hydraulique égale à 1,

on a :
$$K = \frac{q}{S}$$

S : la surface de la section = 2 m²

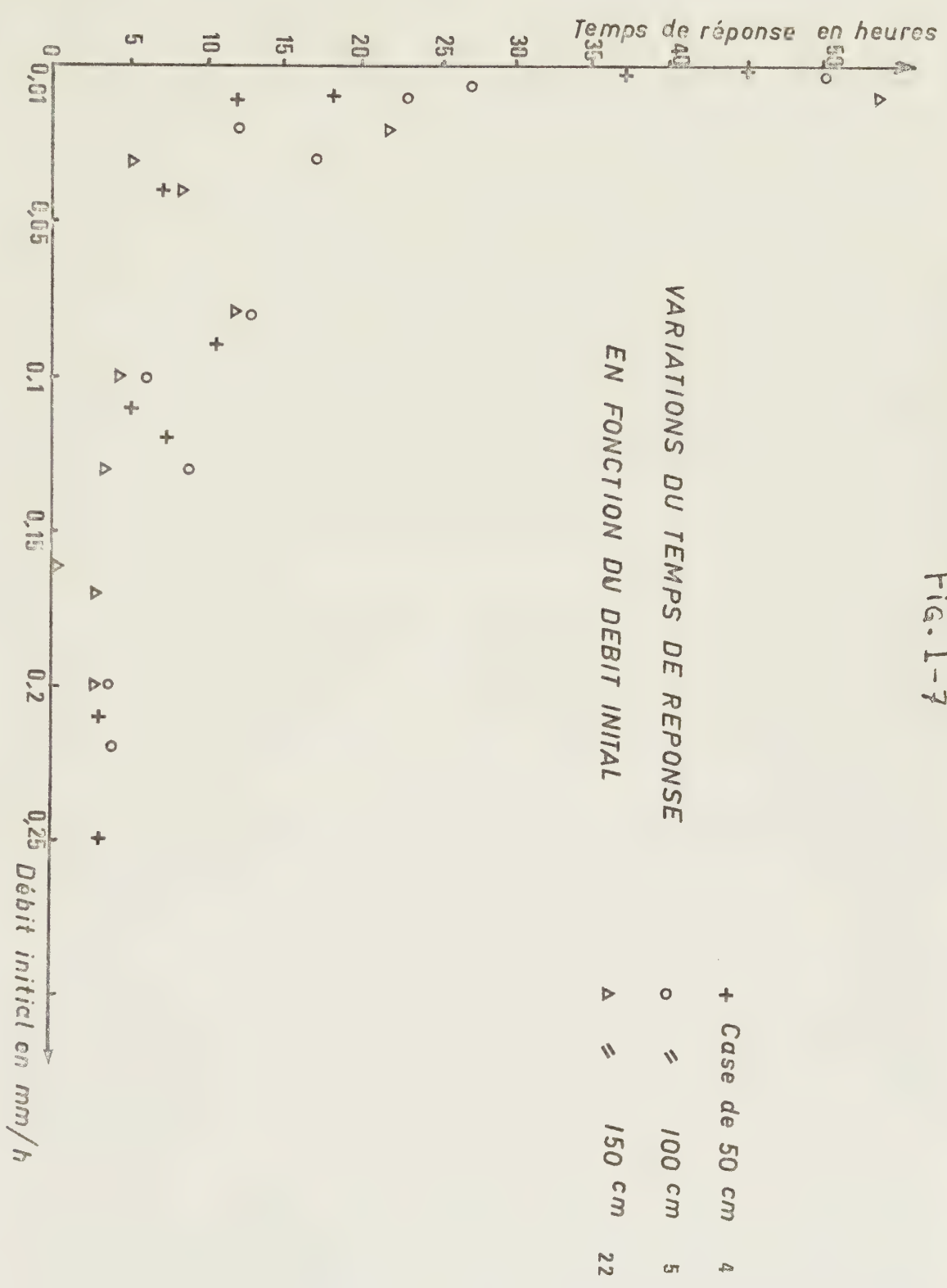
$$K_{150} = \frac{0,0066}{3600 \times 2} = 9,2 \times 10^{-7} \text{ m/s} = 9,2 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$K_{100} = \frac{0,0045}{3600 \times 2} = 6,8 \times 10^{-7} \text{ m/s} = 6,1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

$$K_{50} = \frac{0,0039}{3600 \times 2} = 5,5 \times 10^{-7} \text{ m/s} = 5,5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

Les trois cases manifestent ici une perméabilité moyenne.

Fig. I-7



7) Temps de montée : c'est l'intervalle de temps ($t_2 - t_1$) entre le début et la fin de la courbe de montée. Il dépend surtout de la durée et de l'hétérogénéité de la pluie et de la profondeur du sol, ainsi que sa teneur initiale en humidité. La croissance de débit est assez lente pendant l'arrivée des premières gouttes de drainage, elle devient ensuite très rapide jusqu'au début de pointe. La durée du temps de montée varie au cours des cas sélectionnés de 2 à 24 heures.

8) Volume écoulé pendant le temps de montée : nous avons divisé le volume d'eau total écoulé au cours d'un épisode de drainage en deux parties : le volume écoulé pendant la courbe de montée, et celui drainé au cours de la décroissance de celle-ci. La fin de la pluie peut être également un critère pour effectuer cette division car le volume d'eau drainé après la pluie représente la quantité d'eau stockée dans la réserve, en plus de la capacité de rétention moins certaines pertes par évaporation. Mais comme nous parlerons souvent de la courbe de décroissance de débit, nous avons préféré présenter le drainage total correspondant à chaque hydrogramme par deux parties, une avec le débit croissant et l'autre avec le débit décroissant. Les colonnes 8 et 11 des tableaux présentent ces valeurs pour une dizaine de cas sélectionnés.

9) La durée de décroissance : nous l'avons définie comme l'intervalle de temps couvert par la courbe de décroissance du débit de drainage ; autrement dit, l'intervalle de temps pendant lequel le débit est régulièrement en baisse. Cette durée varie dans les cas de tarissement non complet suivant la distance entre deux pluies successives, et dans les cas de tarissement très poussé, suivant la profondeur des cases.

On aperçoit dans la colonne correspondante du tableau que cette durée varie de 3 heures (cela est certainement le cas d'un sous-épisode) à 980 heures, c'est-à-dire 41 jours environ. Nous en parlerons au cours d'études des épisodes de drainage.

10) La dernière colonne du tableau présente le débit final, pour chaque épisode qui doit être normalement le débit minimum observé à la fin de la courbe de décroissance. Au cas de deux épisodes successifs, le débit final du premier sera bien entendu le débit initial du second. Les caractéristiques pluviométriques de chaque épisode sont présentées également à la fin.

Après cette présentation assez détaillée de différentes composantes des hydrogrammes en général, nous examinerons les épisodes chacun séparément comme dans le cas de drainages journaliers. Ici encore, les épisodes seront divisés en deux catégories suivant qu'ils sont situés au cours des mois chauds ou des mois froids de l'année.

DATE	L cm	D. R.	Q _i mm/h	Tr h	Q Max mm/h	Tm h	Vc li mm	D.dec h	Tv h	V.dec li mm	Q min mm/h	V li mm	PLUVIOMETRIE		
													H mm	P h	I Max mm/h
7 Février 1968	50	16 H 30	0,11	5,	0,83	4,5	4,5 2,25	21 H 00	27	15,22 7,6	0,12	19,7 9,85	9,7	9,0	1,08 1,5
	100	17 H 30	0,10	6,	0,02	3,5	4,72 2,36	21 H 00	27	15,70 7,85	0,13	20,4 10,2			
	150	15 H 45	0,10	4,25	1,46	4,25	6,45 3,22	20 H 00	27	14,10 7,05	0,13	20,5 10,3			
8 - 9 Février 1968	50	01 H 00 9 f	0,12	7,25	0,19	5,00	1,28 0,64	06 H 00	113,5	11,80 5,9	0,027	13,0 6,54	2,5	4,5	0,55 1,2
	100	02 H 30 9 f	0,13	8,75	0,17	4,00	1,32 0,66	06 H 00	117,0	15,60 7,8	0,031	16,9 8,46			
	150	22 H 30 8 f	0,13	4,75	0,18	7,50	2,10 1,05	06 H 00	114,0	14,60 7,3	0,04	16,7 8,35			
13 - 14 Février 1968	50	23 H 30	0,027	8,0	0,23	7,5	1,84 0,92	07 H 00	138,0	10,78 5,39	0,005	12,6 6,3	8,0	6,25	1,1 1,8
	100	03 H 00 14 f	0,030	11,5	-	-	-	-	-	-	0,02	-			
	150	00 H 00 14 f	0,04	8,5	0,20	12,0	2,80 1,40	12 H 00 14 f	142,0	13,16 6,58	0,02	15,96 7,98			
20 Février 1968	50	03 H 00	0,005	12,0	0,12	12,0	1,80 0,90	13 H 00	15,0	2,92 1,46	0,09	4,72 2,36	8,1	9,0	0,9 1,8
	100	12 H 00	0,02	21,0	0,07	10,0	0,80 0,40	Pas Marqué		1,20 0,60	0,08	2,00 1,00			
	150	13 H 00	0,02	22,0	0,07	10,0	1,00 0,50			1,40 0,70	0,08	2,40 1,20			
	150 N° 8	12 H 00	0,02	21,0	0,07	10,0	0,90 0,45		10,0	1,40 0,70	0,08	2,30 1,15			

DATE	L cm	D. R.	Qi mm/h	Tr h.	QM mm/h	Tm h.	Vc li mm	D.dec	Tv h mm	V.dec li mm	Qmin mm/h	V li mm	PLUVIOMETRIE			
													H mm	D h	I m mm/h	I Max mm/h
20 - 21 Février 1968	50	06 H 00	0,09	10,25	0,28	7,0	2,34 1,17	13 H 00	6,0	2,87 1,34	0,21	5,21 2,60	6,6	11,0	0,66	1,2
	100	07 H 00	0,07	12,50	0,21	8,0	2,20 1,10	16 H 00	4,0	1,65 0,82	0,20	3,85 1,92				
	150 22	07 H 00	0,08	12,00	0,26	7,0	1,80 0,90	14 H 00	4,0	1,40 0,70	0,20	3,20 1,60				
	150 8	07 H 00	0,08	11,00	0,23	7,0	2,00 1,00	14 H 00	4,0	1,40 0,70	0,18	3,40 1,70				
21 - 22 Février 1968	50	19 H 40	0,21	3,00	0,57	3,25	2,80 1,40	23 H 00	11,0	7,80 3,90	0,25	10,60 5,30	5,7	2,3	2,5	7,2
	100	19 H 00	0,20	3,8	0,64	2,50	2,50 1,25	23 H 00	11,0	7,80 3,90	0,22	10,30 5,15				
	150 22	18 H 00	0,20	2,25	1,0	3,0	4,20 2,10	22 H 00	12,0	7,48 3,74	0,17	11,68 5,84				
	150 8	18 H 30	0,18	2,5	0,75	4,0	3,40 1,70	22 H 00	11,0	7,20 3,60	0,18	10,60 5,30				
22 Février 1968	50	10 H 30	0,25	5,0	0,60	3,5	3,30 1,65	14 H 00	17,0	13,10 6,55	0,25	16,40 8,20	8,5	9,7	0,9	1,6
	100	10 H 30	0,22	5,0	0,68	3,5	3,30 1,65	14 H 00	17,0	14,20 7,10	0,22	17,50 8,75				
	150 22	10 H 00	0,17	4,5	0,90	3,0	4,00 2,00	13 H 00	18,0	12,60 6,30	0,20	16,60 8,30				
	150 8	09 H 00	0,18	3,5	0,78	4,0	3,00 1,50	13 H 00	18,0	11,0 5,5	0,20	14,0 7,0				

DATE	L cm	D.R.	Qi mm/h	Tr h	QMI mm/h	Tm h	Vc li mm	D.dec	Tv h	V.dec li mm	Q min mm/h	V li mm	PLUVIOMETRIE		
													H mm	D H	Im mm/h
23 Fevrier 1968	50	07 H 00	0,25	3,0	0,42	4,5	1,70 0,85	10 H 00	670,0	12,50 9,75		21,20 10,60	3,3	1,5	2,2
	100	08 H 00	0,22	4,0	0,42	3,5	1,60 0,80	10 H 00	672,0	29,10 14,55	0,006	30,70 15,35			
	150	07 H 15	0,20	-	0,44	2,0	1,40 0,70	09 H 00	670,0	29,10 14,55	0,008	30,50 15,25			
	150	07 H 15	0,20	-	0,40	2,0	1,40 0,70	09 H 00	670,0	29,10 14,55	0,008	30,50 15,25			
21 - 22 Mars 1968	50	11 H 00 22	0,00	9 P1 37 P2	0,18	4,0	1,00 0,50	17 H 00 23	82,0	9,90 4,90	0,01	10,9 5,45	5,5	3,2	1,6 3,2
	100	07 H 00	0,006	5 P1 27 P2	0,09	18,0	1,40 0,70	01 H 00 24	75,0	8,20 4,10	0,03	9,60 4,80	9,6	4,2	2,2 3,1
	150	09 H 00	0,008	5 P2 27 P1	0,05	-	-	-	-	-	-	5,60 2,80			
	150	08 H 00	0,008	-	0,03	-	-	-	-	-	-	2,20 1,10			
25 - 26 Mars 1968	50	05 H 00 26	0,01	12,0	0,06	14,0	1,10 0,55	19 H 00 26	200 +480	3,34 1,67	0,00	4,44 2,22	5,3	3,5	0,7 2,0
	100	10 H 00 26	0,03	17,0	0,05	10,0	1,10 0,55	23 H 00 26	680,0	12,00 6,00	0,003	13,10 6,55			
	150	20 H 00 26	0,012	27,0	0,025	36,0	1,80 0,90	12 H 00 28	680+	-	-	-			

Tableau Récapitulatif III - 8 - 3

DATE	L cm	D. R.	Qi mm/h	Tr h	Q. MAX mm/h	Tm h	Vc li mm	D. dec	Tv h	VV. dec li mm	Q. Min mm/h	V li mm	PLUVIOMETRIE			
													H mm	P h	I mm/h	II mm/h
31 Oct.	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,3	1,1	5,7	22,2
1 Nov. 1968	100	08 H 00	0,015	10	0,25	4,0			10,0		0,22	5,40 2,70				
	150	06 H 00	0,020	8	0,39	4,0			11,0		0,22	8,80 4,40				
SUITE	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,8	7,25	2,5	6,6
1 Nov. 1968	100		0,22	4	2,25	2			458,0		0,006	50,60 25,30				
	150		0,22	3	3,30	2			460,0		0,006	43,0 21,5			8,2	12,25
11 - 12 Mars 1968	50	07 H 00 12	0,00	18 P1 10 P2	1,98	21,0	16,80 8,40	05 H 00 13	980	38,40 19,20	0,00	55,2 27,6	32,05	34,7	0,93	6,7
	100	12 H 00	0,01	23, P1 15 P2	2,19	17,0	12,60 6,30	05 H 00	980	47,68 23,84	0,008	60,28 30,14				
	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
	50	22 H 00 22		45,0	0,18	16,0	2,60 1,30	12 H 00 23	66	8,60 4,30	0,04	11,2 5,60	19,0	4,2	4,6	8,0
21 Avril 1969	100	04 H 00 23	0,008	51,0	0,09	20,0	2,40 1,20	02 H 00 24	45	7,50 3,75	0,02	9,90 4,95				
	150	12 H 00 23	0,01	59,0	0,08	24,0	2,20 1,10	12 H 00 24	41	3,40 1,70	0,03	5,60 2,60				

Tableau Récapitulatif III - 8 - 4

Tableau Récapitulatif III - 8 - 5

DATE	L cm	D.R. H MM	Qi mm/h	Tr h	Q Max mm/h	Tm h	Vc li mm	D. dec H MM	Tv h	Vdec li mm	Q min mm/h	V li mm	PLUVIOMETRIE		
													H mm	D h	Im mm/h
25-26	50	06 H 00 26	0,04	6,0	1,5	4,0	5,00 2,50	10 H 00 26	590	12,60 6,30	0,00	17,60 8,80	10,8	7,75	1,4 6,4
Avril	100	09 H 00 26	0,02	9,0	1,2	2,0	3,20 1,60	11 H 00	589	22,00 11,00	0,005	25,2 12,6			
1969	150	05 H 00	0,03	5,0	1,37	3,0	4,10 2,05	09 H 00	590	21,70 10,85	0,005	25,8 12,9			
23	50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18,3	14,5	1,26 2,8
Juin	100	00 H 00 26		13,5 P2 48 P1	0,8	2,0	1,00 0,50	03 H 00	687	20,0 10,0	ε	21,0 10,5			
1969	150	23 H 00 26		12,5 P2 47 P1	0,7	2,0	1,00 0,50	02 H 00	688	15,5 7,7	ε	16,5 8,25			

L : Profondeur de la case étudiée

D.R. : Début de réponse

Qi : Débit Initial

Tr : Temps de réponse

QMax : Débit maximum observé

Tm : Temps de montée

Vc : Volume et hauteur du drainage avec le débit croissant

Vdec

: Volume et hauteur du drainage avec le débit décroissant

Ddec

: Début de décroissance du débit

Tv

: Temps de vidange

Qmin

: Débit minimum à la fin de l'épisode

V

: Volume et hauteur totaux de drainage

III. - 3 - 2 Analyse des hydrogrammes

Nous avons défini précédemment les différents éléments des hydrogrammes du drainage et leurs utilités ; nous avons donné également les tableaux qui englobent les renseignements au sujet des différents épisodes du drainage. Il faut noter que, parmi les périodes sélectionnées, certaines comprennent plusieurs épisodes successifs ; les caractéristiques des hydrogrammes de chacun ont été présentées séparément. Une autre case de 150 cm (case N° 8) a été étudiée à partir du 20 février 1968, ce qui porte le nombre des cases de 150 à deux, permettant ainsi la comparaison des résultats de cases de même profondeur.

L'examen des enregistrements montre que pour les années dont le drainage a été suivi, il y a drainage en permanence dans les cases profondes ; le débit prend des valeurs extrêmement faibles mais non nulles : de l'ordre du millième de mm/h, à la fin des épisodes et atteint les valeurs importantes : 3 mm/h après les pluies abondantes. Les résultats obtenus par cette étude sont en accord avec ceux déjà observés au cours de l'analyse des données journalières ; de plus, ici, nous avons certaines précisions sur des éléments qui intéressent la circulation de l'eau dans les cases.

Voici brièvement les résultats qui peuvent être soulignés à partir de ces observations :

- Etant donné que l'état de l'humidité du sol avant l'arrivée de la pluie varie d'un cas à l'autre, le temps nécessaire pour l'eau afin de provoquer le drainage est également différent. Comme il a été indiqué le débit initial qui est observé au début de chaque épisode est un indice de l'humidité du sol avant la pluie ; ce débit varie suivant l'importance de la pluie précédente, ainsi que l'intervalle de temps qui le sépare de cette pluie. La profondeur de la couche du sol et le pouvoir évaporant de l'atmosphère influencent évidemment ce débit. Les valeurs du débit initial pour les épisodes étudiés varient de 0 à 0,2 mm/h, le débit 0 correspond à la case de 50 cm qui s'arrête de drainer à la fin de certains épisodes, tandis que les cases plus profondes ont encore un débit non négligeable. Mais ce débit, surtout quand il s'agit du drainage à la fin des épisodes longs, n'est en vérité que représentatif de l'humidité d'une couche peu épaisse, à la base, qui a encore une humidité excédentaire à la capacité au champ, l'humidité de la couche supérieure étant conditionnée en grande partie par l'évaporation. A ce sujet, nous possédons trois profils hydriques correspondant à deux cases nues et une case protégée contre l'évaporation, toutes les trois profondes de 150 cm.

Ces profils, établis par G. Monnier le 16 mai 1960, sont présentés sur le graphique I - 9. Les mesures de l'humidité ont été effectuées au moment où les cases ont été exposées à une longue période sans pluie (27 jours), sauf les journées du 12 et 13 mai qui ont été marquées seulement par 1,5 et 1,6 mm de pluie. On remarque que les deux profils appartenant aux deux cases nues, tout en restant identiques entre eux, diffèrent beaucoup de celui de la case mulchée. Cette différence intéresse une profondeur de 50 cm qui est influencée par l'évaporation. Le débit de drainage pour les trois cases au même jour (le 16 mai 1960) est de :

Case 22 nue	Case 16 nue	Case 20 mulchée
0,14 mm/j	0,17 mm/j	0,19 mm/j
ou 0,005 mm/h	0,007 mm/h	0,008 mm/h

Ces valeurs correspondent aux plus faibles débits initiaux observés au cours de notre étude, c'est-à-dire le 22 mars 1968 où les cases de 150 cm ont un débit de 0,008 mm/h ; le drainage continue donc, bien que le déficit de la couche supérieure soit assez important : 37,4 mm pour la case de 150 cm nue contre 5,7 mm de la case mulchée. Mais on voit qu'au-delà de 60 cm de profondeur, les trois cases ont une humidité supérieure à la capacité de rétention, la case mulchée ayant tendance à présenter une humidité un peu plus élevée et, par conséquent, un drainage légèrement plus grand que celui des cases nues. La comparaison des profils hydriques des cases nues et de la case mulchée peut donner une idée sur les profils d'une même case pendant deux saisons ayant les pouvoirs évaporants différents ; autrement dit, le profil hydrique de la case protégée peut être considéré comme celui d'une case nue, mais correspondant à une époque où l'évaporation est beaucoup moins importante. L'intérêt de cette comparaison intervient dans l'interprétation de certains phénomènes tels que la vitesse de transfert que nous avons évoquée précédemment.

Nous avons vu que, d'après le tableau III- 7 qui présente cette vitesse suivant les différentes valeurs du débit initial, et le graphique I - 7, la variation du temps de réponse en fonction du débit initial, qu'il y a une corrélation assez étroite entre ces deux phénomènes. Mais certaines exceptions telles que l'exemple suivant peuvent être interprétées par les profils hydriques :

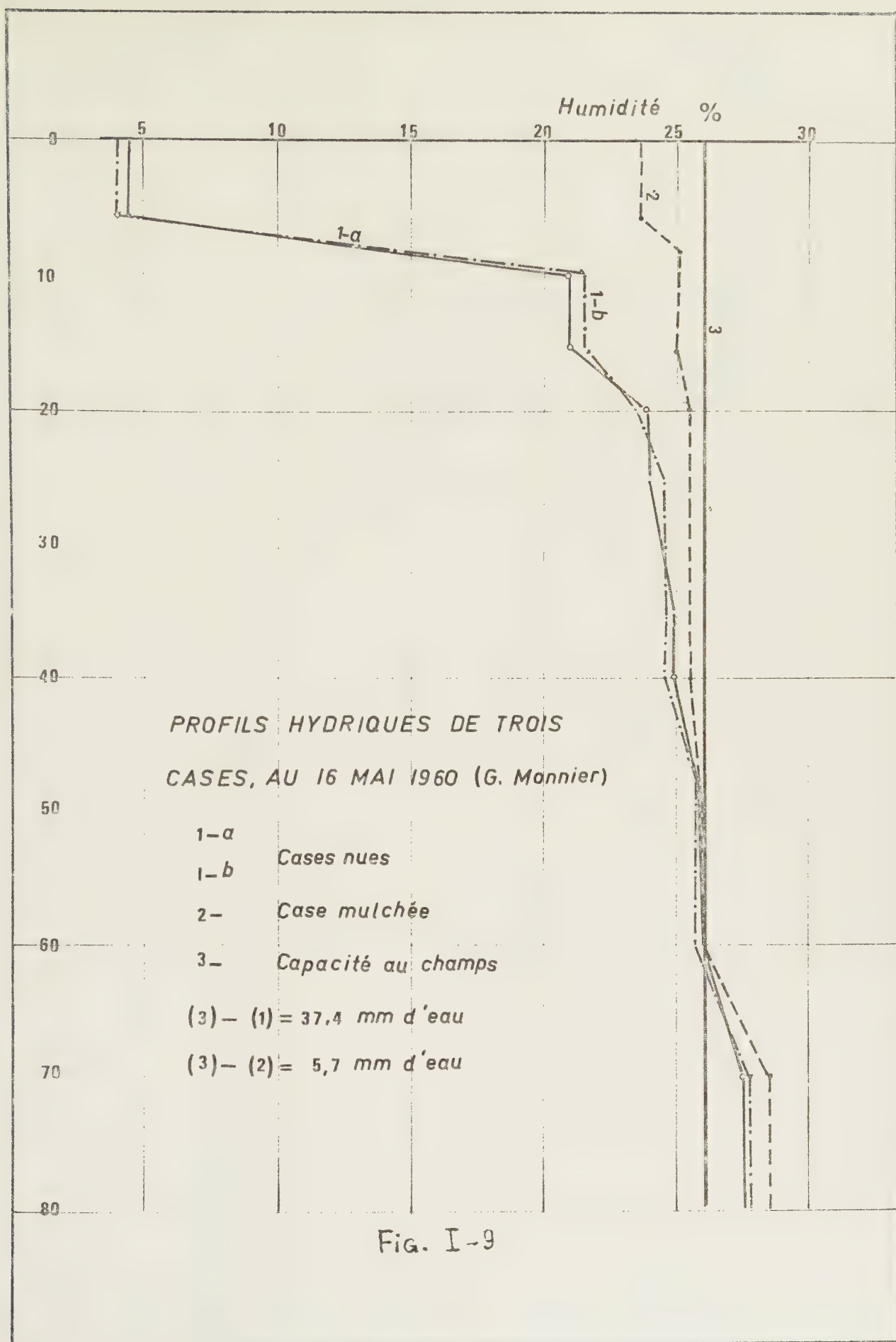
Le débit initial de la case nue (150 cm) étant 0,02 mm/h le 1er Novembre 1968 et 0,01 mm/h le 23 avril 1969, le temps de réponse est 8 heures pour le premier cas et presque 59 heures pour le second. La différence du débit initial de deux cas (0,01 mm/h) n'est pas si importante pour que cette grosse différence de 51 heures de temps de réponse soit due seulement à celui-ci. On peut donc penser que cela vient surtout du fait que l'humidité de la couche supérieure de la case est différente d'un cas à l'autre. Le 1er novembre 1968,

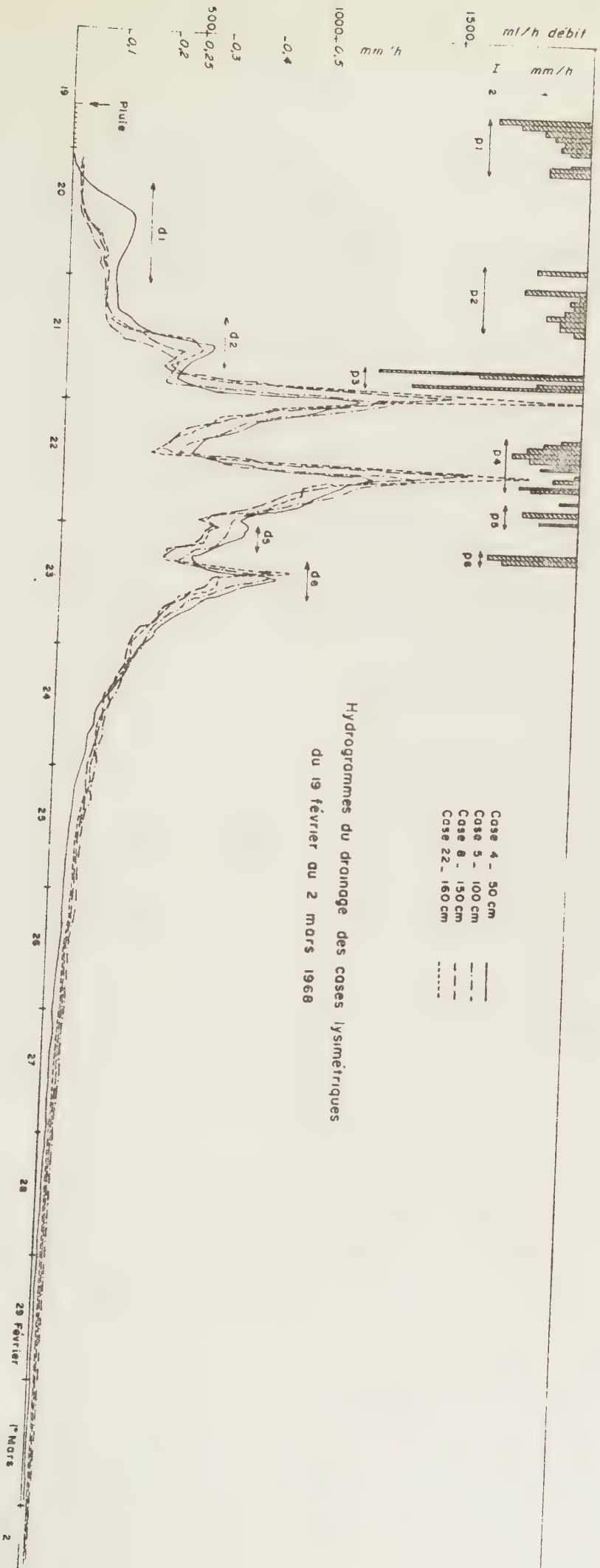
Tableau II - 8 - 6

DATE	L cm	Qi mm/h	Tr h	Tm h	Tv h	QM mm/h	Qm mm/h
19 - 20	50	0,005	12,0	12,0	15,0	0,12	0,09
Février	100	0,02	21,0	9,0	8,0	0,07	0,08
1968	150	0,02	22,0	10,0	9,0	0,07	0,08
	150	0,02	21,0	10,0	10,0	0,07	0,08
20 - 21	50	0,09	10,2	7,0	6,0	0,28	0,21
Février	100	0,08	12,5	8,0	4,0	0,16	0,20
1968	150	0,08	12,0	7,0	4,0	0,26	0,20
	150	0,08	11,0	7,0	4,0	0,23	0,18
21	50	0,21	3,0	3,2	11,0	0,57	0,25
Février	100	0,20	3,8	2,5	12,0	0,64	0,22
1968	150	0,20	2,2	3,0	12,0	1,00	0,17
	150	0,18	2,5	4,0	11,0	0,75	0,18
22	50	0,25	5,0	3,5	17,0	0,60	0,25
Février	100	0,22	5,0	3,5	17,0	0,68	0,22
1968	150	0,17	4,5	3,0	18,0	0,90	0,20
	150	0,18	3,5	4,0	18,0	0,78	0,20
23	50	0,25	3,0	4,5	670,0	0,42	ε
Février	100	0,22	4,0	3,5	672,0	0,42	0,006
1968	150	0,20	4,0	4,5	670,0	0,44	0,008
	150	0,20		2,0	670,0	0,40	0,008

Caractéristiques des hydrogrammes du drainage

Légende : voir tableau III - 8 - 5 page 59





faute d'évaporation importante, l'humidité est voisine de la capacité au champ et l'écoulement est presque gravitaire; dans le second cas, le 23 avril 1969, où il existe un déficit, l'eau apportée par la pluie a tendance à occuper tout d'abord la partie de porosité concernée par ce déficit hydrique (A. Féodoroff, 1969). Au cas où la pluie continue, l'eau s'écoule lentement vers le bas pour être ensuite drainée.

Pour voir cela plus clairement, nous examinons un épisode au cours duquel nous assistons au remplissage répété des réserves et, à la fin, la vidange quasi-totale des couches drainantes. La figure I - 8 - 1 montre les hyétogrammes de cinq épisodes de pluie et les oscillations que subissent les quatre hydrogrammes du drainage, à la suite des recharges successives du sol par les pluies. Pour résumer la position des hydrogrammes et leurs variations, on a rassemblé pour chaque épisode pluvieux, leurs caractéristiques de forme dans un tableau. Deux séries de comparaisons sont ensuite possibles :

- les comparaisons inter-épisodes pour étudier l'effet des facteurs pluviométriques et celui de la teneur en eau du milieu ;
- et les comparaisons inter-cases, pour voir bien entendu l'effet de la profondeur.

L'examen du tableau III - 8 - 6 montre qu'au fur et à mesure que les pluies alimentent la réserve en eau du sol et que, par conséquent, le débit initial du drainage augmente, le temps de réponse diminue et cela d'autant plus que l'intensité des précipitations est plus importante. Le rôle de l'épaisseur de la couche drainante semble être assez mal défini pour ce qui concerne le passage du front vers la base. D'après les observations effectuées au cours de quelques épisodes pluvieux, il semble que la vitesse du mouvement descendant de l'eau serait plus élevée dans un sol plus profond et, bien entendu, initialement humide (Tableau III - 7 -) ; à moins que les comportements du sol des cases étudiées ne soient différents, jouant ainsi un rôle dans ce phénomène. Les résultats présentés dans la colonne 4 du tableau III - 8 - 6 montrent que les valeurs de T_r (temps de réponse) s'approchent beaucoup pour les cases dont la profondeur varie de 50 à 150 cm.

C'est seulement quand le sol est suffisamment ressuyé que T_r croît avec la profondeur des cases, par exemple, le 19 février avec $Q_i = 0,005$ à $0,02$ mm/h $T_r = 12$ h pour $L = 50$ cm et 21 à 22 h pour $L = 150$ cm. Dès que les débits initiaux sont assez élevés, T_r devient presque le même pour toutes les cases étudiées, et pour les plus forts débits initiaux, il est même plus petit dans les cases peu profondes, comme le montre l'exemple suivant :

Le 21 et le 22 février 1968

$$Q_1 = 0,17 \text{ à } 0,25 \text{ mm/h}$$

$$Tr_{5 Q 100} = 5 \text{ heures}$$

$$Tr_{150} = 3,5 \text{ heures}$$

D'autre part, au-dessus d'une certaine humidité, les pluies intenses provoquent généralement un débit qui est, semble-t-il, lié à la profondeur pendant deux ou trois heures après la fin de la pluie ; sur les hydrogrammes (cf. fig. I - 6 et I - 8 - 1), les débits de pointe les plus forts correspondent aux plus grandes profondeurs. Pour les deux pluies P3 et P4, qui ont donné pour les quatre cases des débits de pointe supérieurs à 0,55 mm/h on a :

		50 cm	100 cm	150 cm	
Pour P3	QM est	0,57	0,64	0,75	1,0
Pour P4	QM est	0,60	0,68	0,78	0,9

Mais pour les pluies P1, P2 et P6 qui ont donné pour les quatre cases des débits de pointe inférieurs à 0,45 mm/h, la règle n'est pas si claire ; la pluie P1 a servi le 19 février en grande partie, à remplir les déficits ; la réponse et la montée du drainage sont plus sensibles dans la case de faible profondeur.

III. - 3 - 3 Quantité totale de drainage et sa répartition dans le temps

L'examen des hydrogrammes montre que, dans la majorité des cas et surtout pendant les périodes où le déficit du sol n'est pas très grand, (périodes de faible évaporation), la plus grande partie du drainage est écoulee au cours de quelques heures ; surtout quand la pluie a une courte durée, le débit du drainage retombe après 25 à 30 heures à sa valeur initiale ; c'est le cas, par exemple, de l'épisode I - a (7 février 1968), le débit initial étant 0,12 mm/h (cf. graphique I - 8 - 2). Il est clair que cet épisode se situe dans une zone de drainage intense, c'est-à-dire que les débits initiaux pour les trois cases dépassent 0,10 mm/h qui correspondent à 2,4 mm/j, étant bien sûr supérieur à 0,5 mm/j que nous avons choisi comme un seuil entre les débits intenses et les débits faibles. De même, les débits minimums observés à la fin de l'épisode sont du même ordre de grandeur. Cela indique que cette pluie du 7 février est survenue au moment où le sol draine encore avec un débit assez fort. Par conséquent, pendant la saison froide où en absence d'évaporation importante, la teneur en eau sur l'ensemble du profil s'est suffisamment élevée, la totalité de la pluie est susceptible d'être drainée au cours d'un temps assez court.

Si nous effectuons des bilans entre les apports qui sont seulement les pluies et les pertes dues au drainage à l'échelle de l'épisode, c'est-à-dire entre deux instants t_2 et t_3 de l'hydrogramme, il y a trois possibilités :

- 1) Le drainage dépasse largement la pluie
- 2) Le drainage est à peu près égal à la pluie
- 3) Le drainage est inférieur à la pluie

Le premier cas se produit sans doute pendant la saison froide où les évaporations ne jouent qu'un rôle presque négligeable.

Exemple :

Episode I - b 8 - 9 février 1968 : le tableau ci-dessous présente la hauteur totale du drainage, ainsi que les fractions de celui-ci écoulees pendant et après la pluie.

Drainage	Case 50	Case 100	Case 150 cm
Pendant P	0,65	0,65	1,05 mm
Après P	5,90	7,80	7,30 mm
Total	6,55	8,45	8,35 mm

Ces chiffres sont certainement supérieurs à 2,5 mm de pluie qui a provoqué ce drainage. On peut donc considérer la pluie de 2,5 mm du 8 février comme une pluie parasite qui provoque une recharge sensible de réserve, alors que les cases sont en régime décroissant, à la suite d'une pluie précédente. Autrement dit, le tarissement se poursuit avec un débit instantané que nous connaissons. On peut supposer donc que cette faible quantité de pluie soit drainée presque complètement après peu de temps, car son hydrogramme rattrape la courbe de tarissement principale (celle de l'épisode précédent) au bout de quelques heures. Or, si la fonction de la courbe principale de tarissement entre deux instants t_1 et t_2 est $q_1 t$ et celle de l'hydrogramme de cette nouvelle pluie dans le même intervalle de temps $t_1 t_2$ est $q_2 t$ (t_1 étant l'instant où le débit est modifié par la nouvelle pluie et t_2 l'instant où l'hydrogramme de cette pluie rattrape la courbe de tarissement) ; le volume de drainage entre les deux instants sera voisin du volume d'eau apportée par cette pluie. Autrement dit, si V_d est ce volume supplémentaire et V_p le volume d'eau de la pluie, on a :

$$V_d \approx V_p \approx \int_{t_1}^{t_2} t(q_2 - q_1) dt$$

Cela à condition, bien entendu, que le déficit du sol, ainsi que l'évaporation soient nuls.

A partir de t_2 , les courbes peuvent être considérées comme la continuation de la courbe de tarissement principale.

D'autres exemples peuvent être soulignés ; à ce sujet, le tableau ci-dessous donne la hauteur du drainage totale de l'épisode I-a provoqué par une pluie de 9,7 mm.

Drainage	Case 50 cm	Case 100 cm	Case 150 cm
Pendant P	0,90	0,50	1,70
Après P	8,95	9,70	8,55
Total	9,85	10,20	10,30

Dans cet exemple, le drainage est très voisin de la pluviométrie. Par contre, si on compare le drainage et la pluviométrie de la période du 7 au 20 février, on a :

Date	P mm	Drainage mm		
		Case 50	Case 100	Case 150
7 - 8 fév.	9,7	9,85	10,20	10,30
8 - 13 fév.	2,5	6,55	8,46	8,35
13 - 20 fév.	8,0	6,31	-	7,98
Total	20,2	22,71	-	26,63

Il y a donc, au total, un excès net du drainage par rapport à la pluviométrie au cours de cette période. L'évaporation à partir de la surface du sol n'est certainement pas nulle pendant ce temps. Etant donné que le drainage a encore un débit non négligeable à la fin de cette période, il faut penser à une réserve R_2 . La relation suivante devient par conséquent très évidente :

$$Dr + E + R_2 > P$$

Pour l'égaliser, il faudra ajouter à P une quantité R_1 , qui représente la réserve en eau du sol, le 7 février au point de départ :

$$Dr + E + R_2 = P + R_1$$

ou

$$P = Dr + E + (R_2 - R_1)$$

D'après le tableau ci-dessus, la valeur de $R_2 - R_1$ pour la période du 7 au 20 février est de 2,5 mm pour la case 50 et 6,4 mm pour celle de 150 cm, à la valeur de E près. On peut estimer que la différence entre ces deux valeurs (3,9 mm) représente la différence de la réserve en eau de deux cases au début de la période, autrement dit, la différence entre les deux valeurs R_1 .

III. - 3 - 4 Courbes de pluies et de drainages cumulés

Pour voir mieux la variation de la hauteur totale de drainage par rapport à la hauteur de pluie, suivant les conditions atmosphériques, nous avons choisi quatre périodes au cours de notre observation, et nous avons tracé pour chacune, la courbe cumulative de la pluie, ainsi que deux ou trois courbes de drainage cumulé, correspondant à des cases de différentes profondeurs.

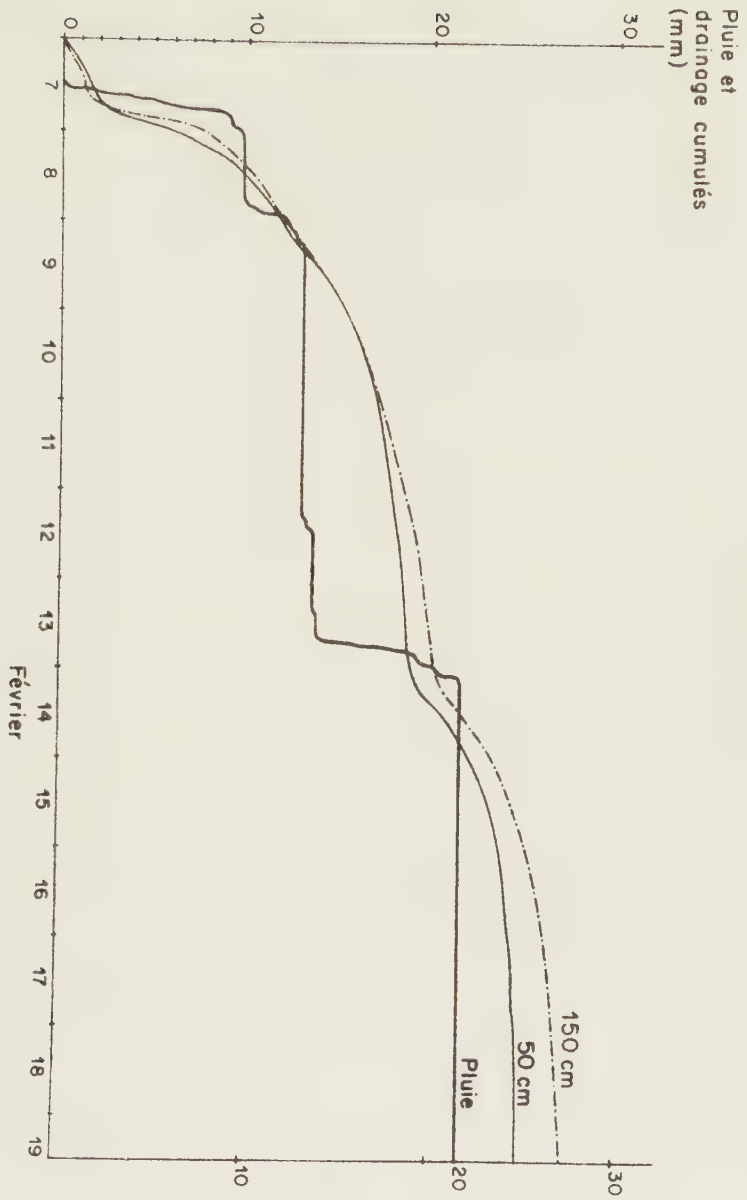
Ces quatre périodes sont les suivantes :

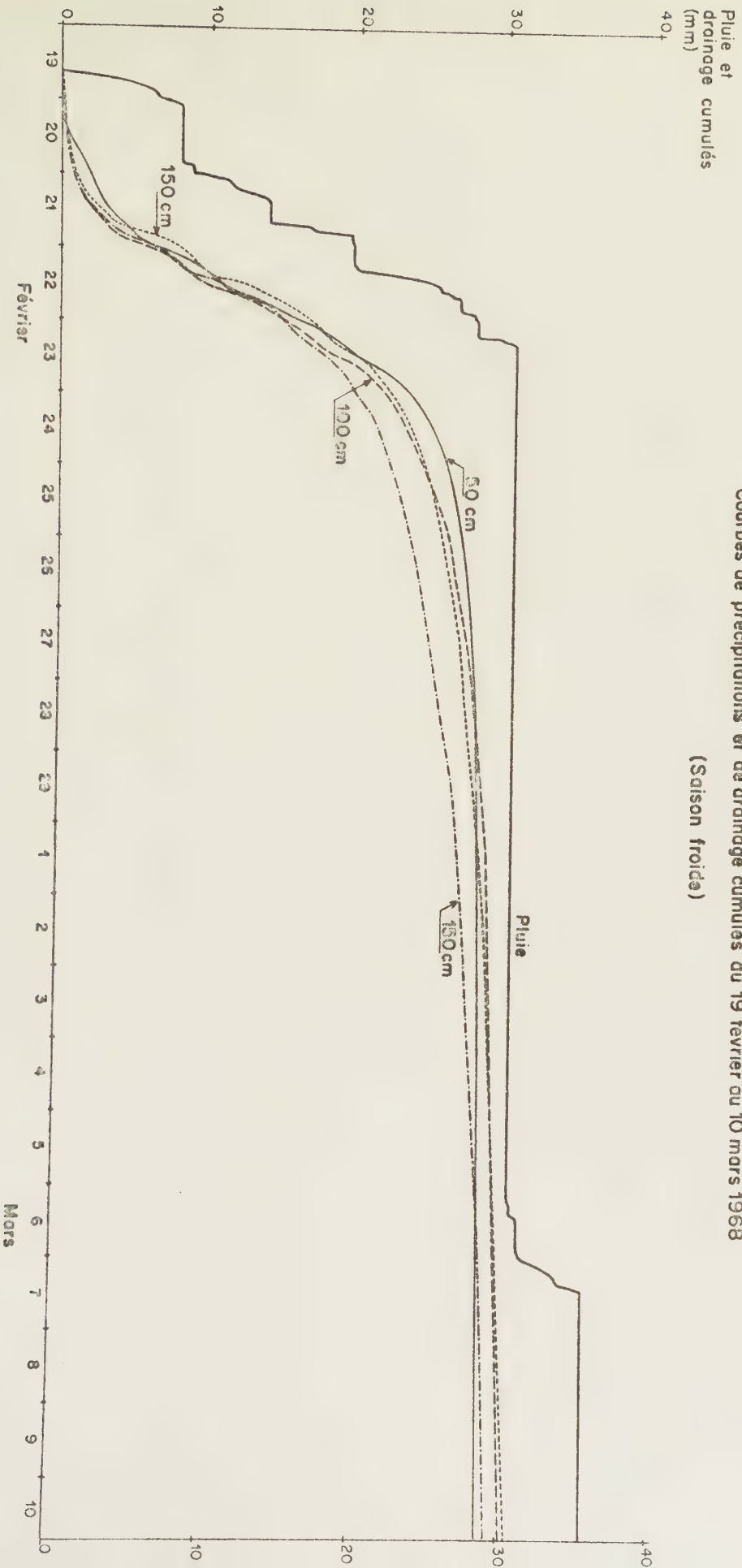
1. - du 7 au 20 février 1968 : très froide
2. - du 20 fév. au 11 mars 1968 : froide
3. - du 10 mars au 22 avril 1969 : tiède
4. - du 22 avril au 20 mai 1969 : chaude

Ces courbes sont présentées respectivement sur les graphiques I - 10 - 1 à I - 10 - 4.

La position des courbes de drainage des cases suivant la profondeur montre qu'en général, la partie finale de la courbe des cases profondes a une pente plus forte que celle des cases moins profondes, ce que nous avons déjà vu (importance du drainage à la fin des épisodes dans ces cases). D'autre part, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la saison froide, les courbes du drainage s'éloignent de celles de la pluie, sous l'influence de l'évaporation.

Fig. I-10-1
Courbes de précipitations et de drainage cumulé du 7 au 20 février 68
(Saison froide)





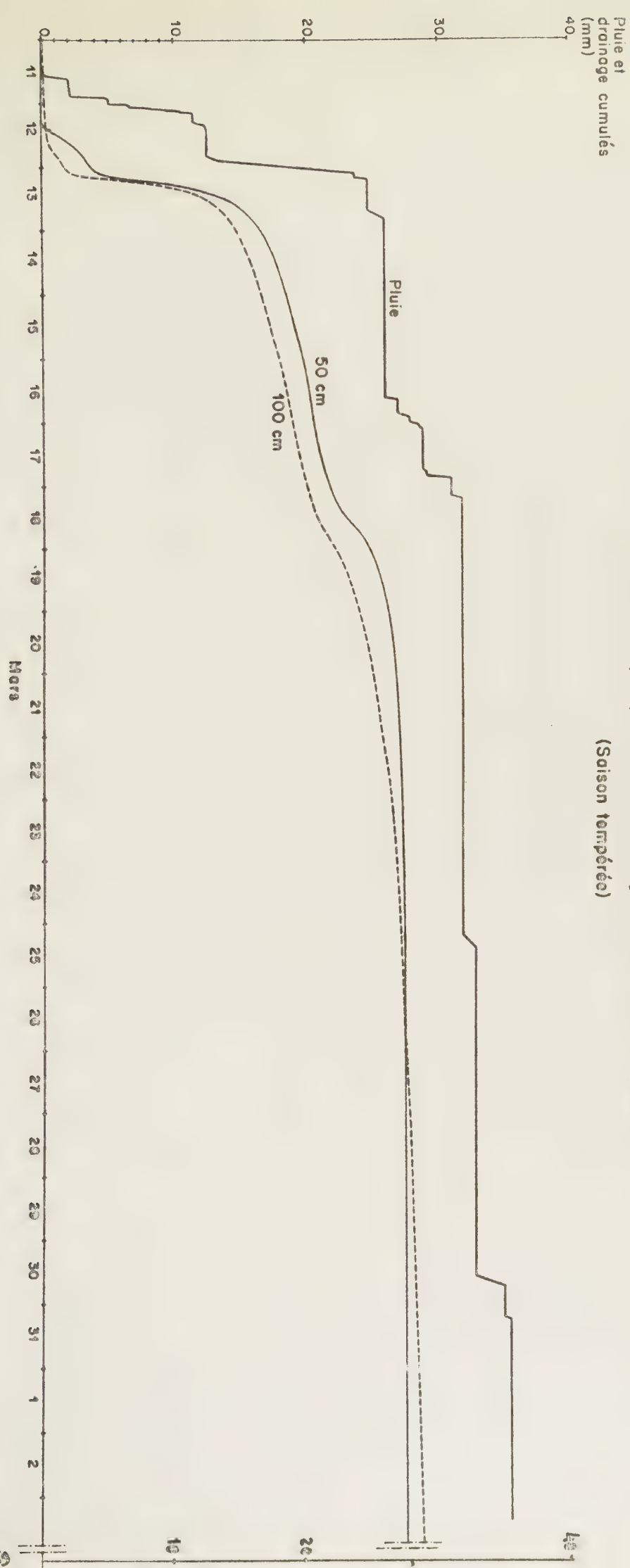
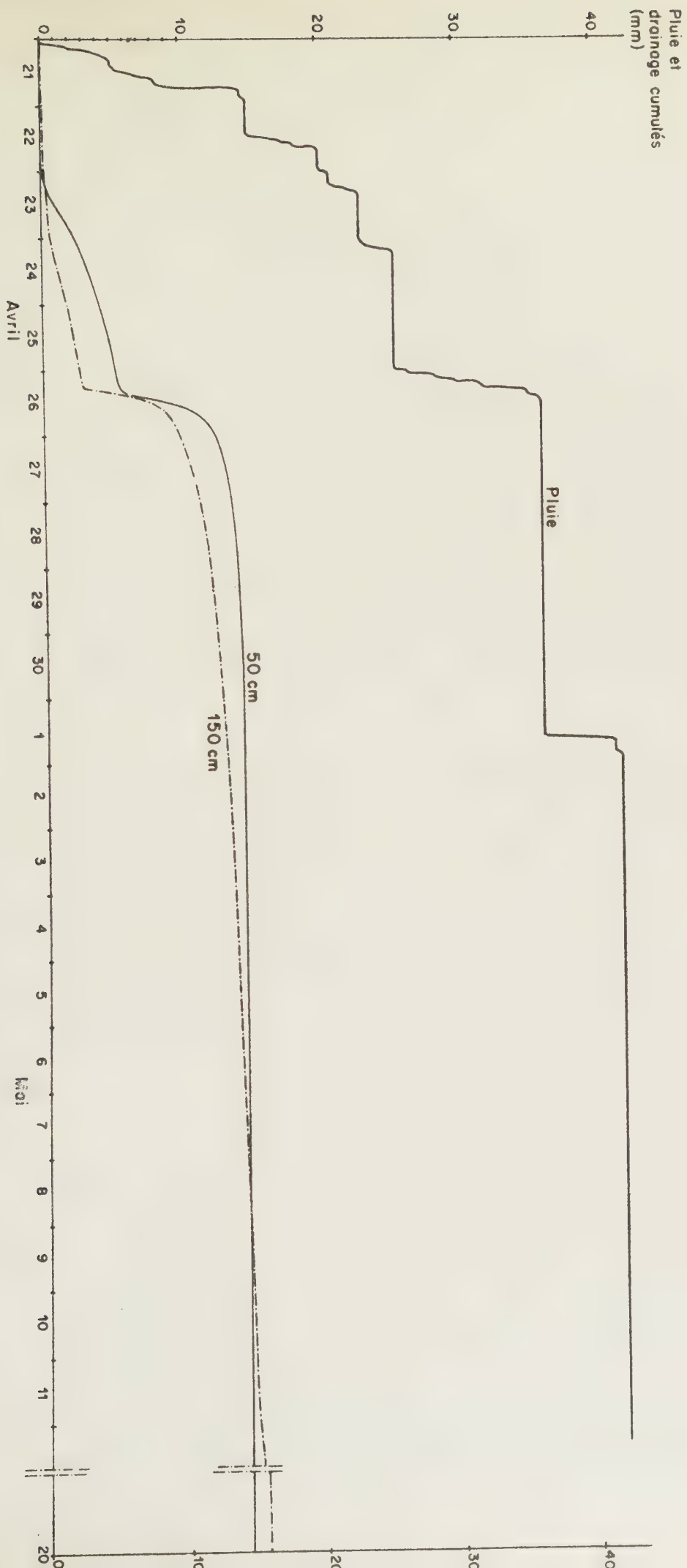


Fig. I-10-3
Courbes de précipitations et de drainage cumulés-Mars-avril 1969
(Saison tempérée)

22/avril 69

Fig. I-10-4
Courbes de précipitations et de drainage cumulé. Avril-mai 1969
(Saison chaude)



III. - 3 - 5 Hydrogramme du drainage à partir d'une fonte de neige et pendant la période de gel.

Les enregistrements du drainage des trois cases ont commencé le 6 février 1968, et nous n'avons pas rencontré de jour pour lequel la moyenne de température nyctémérale soit au-dessous de zéro °C. Mais le drainage d'une seule case lysimétrique avec une profondeur de 150 cm a été enregistré et suivi depuis le 3 janvier 1968. La courbe représentative de l'évolution du débit jusqu'à la fin de janvier est établie en portant toujours en abscisse le temps en heures, et en ordonnée, le débit en mm/h. Ainsi, au cours de ce mois, nous distinguons quelques cinq ou six hydrogrammes, dont deux sont bien caractéristiques, le premier étant dû à une pluie et le second à une fonte de neige et rencontrant 3 jours de gel pendant la décroissance de son débit. Cet hydrogramme se situe entre le 9 et le 14 janvier. La neige étant tombée à deux reprises, la partie la plus importante est terminée le 9 à 10 heures, avec une hauteur d'eau équivalente à 10,3 mm.

La croissance du débit commence trois heures après, c'est-à-dire à 13 heures, car la fonte de neige s'est produite assez rapidement. Une autre chute de neige s'est terminée à 23 heures, avec une hauteur d'eau équivalente de 2,6 mm. Le drainage n'a pas été beaucoup affecté par cette seconde chute de neige qui a été répartie sur plusieurs heures et fondue au fur et à mesure de la chute. Les températures moyennes journalières des 10, 12 et 13 janvier, où le drainage est en baisse, sont respectivement : - 4,05, - 0,85 et - 3,25 °C. Mais il paraît que le drainage a suivi une baisse régulière sans être apparemment gêné par le gel, car la hauteur du drainage au cours de 110 heures (temps de base de l'hydrogramme) est très sensiblement égale à la hauteur des précipitations :

$$Dr = 12,85 \text{ mm} \quad \text{et} \quad P = 12,90 \text{ mm}$$

D'autre part, si on examine le gradient de température d'un sol nu voisin pendant 5 jours de gel au mois de janvier 1968 (données de la Station Centrale de Bioclimatologie du C.N.R.A. : profils thermiques observés à 9 heures du matin), (Cf graphique I - 11), on remarque que, pendant les jours les plus froids de ce mois, le gel n'intéresse qu'une couche de moins de 10 cm de profondeur. Au-delà, la température demeure positive. Mais le mouvement de l'eau dans les cases peut être perturbé par cette petite couche de gelée, faute de circulation de l'air ou bien à cause d'un mouvement ascendant de l'eau vers la couche froide.

Sur le graphique I - 12, les courbes de variations du débit du 3 au 31 janvier sont présentées ; pour une des courbes, l'échelle de temps est divisée en heures, et pour l'autre, en jours. Il est clair que

les petites variations du débit au cours de 24 heures, sont beaucoup mieux marquées, sur la courbe dont l'échelle de temps est plus fine.

III. - 3 - 6 Conclusion

L'application de la méthode des hydrogrammes à l'étude du drainage a cet avantage que l'on peut évoquer un certain nombre de paramètres de ceux-ci qui sont liés soit directement, soit indirectement, aux propriétés du sol et à son état physique en présence de l'eau. Ainsi, nous avons vu que, par exemple, le débit initial est considéré, faute de profil hydrique, comme un indice de la teneur en eau. Bien qu'une telle évaluation ne soit pas précise, nous verrons que, si l'on peut appliquer une loi de tarissement au drainage, le débit de chaque instant peut donner grosso modo une idée sur l'humidité du sol ; à condition, bien entendu, que l'effet de l'évaporation soit le moins perturbant possible. De même, nous avons montré que le temps de réponse peut également être lié à l'humidité et surtout la conductibilité hydrique des matériaux, par exemple pour le temps de réponse, nous avons observé les valeurs qui varient de 3 heures pour le sol initialement humide ayant un débit de drainage de 0,25 mm/h, à plus de 50 heures pour le même sol, mais avec une humidité beaucoup moins importante, son débit de drainage étant de l'ordre de 0,008 mm/h. Par conséquent, pendant la saison froide et en dehors des périodes de gel, une pluviométrie de quelques mm suffit pour provoquer un drainage. Le déficit du sol en humidité est très faible et le drainage commence à augmenter peu après la nouvelle pluie. La vitesse de transfert (L/Tr) qui est, nous l'avons vu, en corrélation étroite avec le débit initial, est plus élevée dans les cases plus profondes. Cela est confirmé par tous les cas observés pendant la saison froide et la différence est d'autant plus nette que le débit initial est plus élevé.

Le temps de montée nous paraît également un indice de la durée de la pluie et l'hétérogénéité de celle-ci, mais aussi de la capacité d'emmagasinement de la couche drainante. Quant au débit maximum, tout en étant lié à l'intensité de la pluie, il représente aussi la perméabilité du terrain ; nous avons calculé à partir des plus grands débits maximum, la perméabilité de trois cases étudiées ; les résultats obtenus ($5,5$ à $9,2 \times 10^{-5}$ cm/s) nous conduisent à une perméabilité moyenne. L'autre remarque au sujet du débit de pointe à souligner, est que, souvent, les cases plus profondes présentent à partir des pluies abondantes et le sol assez humide, un débit de pointe plus grand que celui des cases peu profondes. Il faut préciser à ce sujet que, si la nouvelle pluie survient

à un instant où le débit du drainage est assez faible, c'est-à-dire que l'épisode du drainage précédent est à peu près terminé, le temps de réponse est plus court dans les cases moins profondes et le débit de pointe le plus élevé se produit dans celles-ci ; par contre, si cette pluie interrompt l'épisode précédent à un moment où le débit est assez élevé ($q_1 \geq 0,2$ mm/h dans le cas de nos observations), la situation se trouve inversée, le temps de réponse est plus court pour les cases profondes qui ont d'ailleurs un débit de pointe plus élevé que les cases moins profondes. Ajoutons que ce débit de pointe, même à la suite des pluies les plus importantes que nous avons observées, se produit en un seul instant sans être prolongé dans le temps.

En l'absence de nouvelles pluies, le débit décroît très rapidement et atteint au bout de 25 à 30 heures sa valeur initiale, au cas bien sûr, où celle-ci n'est pas très faible (par exemple, le 7 février, $Q_1 = 0,11$ mm/h et Q minimum après 30 heures devient 0,12 mm/h). Enfin, la courbe de pluie et de drainage cumulés correspondant à quatre périodes représentant les conditions thermiques différentes, montre que : pour la saison froide, la courbe du drainage cumulé rattrape et dépasse même celle de pluie cumulée de cette période ; nous avons estimé la différence comme la quantité d'eau drainable au début de la période, les écarts étant en effet bien supérieurs à ce qu'on pourrait attribuer à des erreurs de pluviométrie. Pendant la saison tempérée, la différence entre deux courbes est assez faible, tandis que cette différence devient considérable au cours de la période chaude. Finalement, nous n'avons pas observé de variations diurnes de drainage, contrairement à ce que l'on verra plus loin pour les "bacs" (en serre froide). Ces variations si elles existent, n'ont pas été apparentes.

III. - 4 TARISSEMENT

Après l'étude des hydrogrammes du drainage et l'analyse des différents composants de ceux-ci, nous avons essayé de voir de plus près l'évolution dans le temps, comme nous l'avons déjà dit, du débit décroissant en absence de toute réalimentation. La courbe de tarissement considérée ici est toute la partie de la courbe de décroissance du débit à partir de la pointe de l'hydrogramme. Elle comprend donc aussi ce que l'on appelle la courbe de décrue dans l'étude de l'hydrologie des cours d'eau et qui correspond à l'évacuation d'eaux de ruissellement. Dans les cases lysimétriques, faute de ruissellement superficiel, le débit est complètement alimenté par les eaux d'infiltration. Nous avons déjà parlé des difficultés qui se manifestent normalement au cours de l'étude du tarissement, surtout quand il s'agit de petites réserves fréquemment alimentées par les pluies et nous avons indiqué également la méthode pratiquée pour choisir des épisodes affectés le moins possible par les éléments qui perturbent la vidange assez longue et non influencée. Au cours de ce chapitre, nous avons brièvement rappelé quelques relations simples qui sont souvent utilisées pour l'étude du tarissement des nappes souterraines à partir des débits des cours d'eau qu'elles alimentent. Mais on sait que ce sont souvent des dispositifs expérimentaux qui sont à l'origine des calculs théoriques appliqués et généralisés, ainsi à l'hydrologie souterraine.

III. - 4 - 1 Rappel de quelques formules appliquées à la courbe de tarissement du drainage

M. Roche (1963) propose d'assimiler le tarissement de certaines nappes souterraines à la "vidange d'un réservoir à travers un bouchon poreux". Ici encore, d'après la loi de Darcy,

$$q = KP \frac{S}{L} h$$

K étant la perméabilité et P la porosité du bouchon.

D'autre part, le débit q pendant le temps dt fait baisser le niveau de l'eau et le volume déplacé sera Sdh

$$Sdh = - q dt$$

étant donné que

$$dh = \frac{L}{KPS} dq$$

et

$$= \frac{KP}{L}$$

$$\frac{dq}{q} = -\alpha dt$$

$$\ln q = -\alpha t + Cte$$

et en partant d'un instant t_0

$$\ln q - \ln q_0 = -\alpha(t - t_0)$$

ce qui donne

$$q = q_0 e^{-\alpha(t - t_0)}$$

Basé sur cette théorie, Maillet a proposé la formule suivante pour la courbe de tarissement

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

ou

$$Q_t = Q_0 e^{-t/T}$$

où Q_0 : le débit à l'instant t_0 choisi arbitrairement

Q_t : le débit à l'instant t au cours du tarissement

e : la base du logarithme népérien

α : le coefficient de tarissement égal à $\frac{1}{T}$, T étant le temps nécessaire pour que le débit initial varie de 1 à $1/e$, soit de 0,368 fois de sa valeur initiale.

Le tarissement d'une case lysimétrique ne peut être assimilé à la "vidange d'un réservoir à travers un bouchon poreux", étant entendu que le réservoir est distinct du bouchon, d'ailleurs, nos courbes de tarissement sont souvent très différentes d'exponentielles.

Nous venons de voir que dans le modèle de Roche, la loi de Darcy s'applique. Il peut aussi se présenter des circonstances où elle s'applique au drainage d'une case ; envisageons, par exemple, une pluie suffisamment intense et de durée suffisamment longue pour établir et maintenir pour un certain temps un plan d'eau libre à la surface du sol ; pendant ce temps, le drainage d'abord croissant, atteint un maximum, puis se maintient en palier ; à ce stade, l'écoulement suit approximativement la loi de Darcy, mais nous n'avons pas eu l'occasion d'observer de tels paliers. (Voir III - 3 - 6).

Nous présentons ci-après un certain nombre de courbes de tarissement obtenues, soit par les débits journaliers, soit par les valeurs recueillies à partir des enregistrements en coordonnées semi-logarithmiques avec en abscisse, le temps en échelle arithmétique, et en ordonnée, le débit q en échelle logarithmique. Lorsque la variation est approximativement exponentielle, les points expérimentaux portés sur un tel graphique se trouvent approximativement sur une droite, étant donné la forme linéaire de l'expression

$$\ln q = \ln q_0 - \alpha t$$

La pente de cette droite (α) ou coefficient de tarissement que nous avons déjà défini comme l'inverse de temps T , au cours duquel chaque valeur tombe à $1/e$ de sa valeur initiale, dépend des facteurs physiques du sol et de l'eau tels que la perméabilité du terrain, la porosité, la teneur en eau et la viscosité de l'eau. Pour chaque épisode étudié, nous avons envisagé que l'ensemble de ces facteurs sont identiques pour les trois cases, ce qui permet de lier les changements à la seule variable, c'est-à-dire la profondeur.

III. - 4 - 2 Ajustement des données

Parmi tous les cas sélectionnés d'après les débits journaliers, les courbes de tarissement de cinq épisodes ont été portées sur les diagrammes semi-logarithmiques. Les origines de temps pour les cinq cas, sont respectivement

le 14 décembre 1961

le 24 novembre 1962

le 8 août 1965

octobre 1965

le 20 juillet 1966

On aperçoit, d'après les graphiques I - 13 - 1 à I - 13 - 5, que, pour chaque case, les points expérimentaux s'arrangent de façon telle que l'on peut les ajuster à deux droites successives, distinguées par deux pentes plus ou moins différentes : une pente assez forte de la droite qui correspond à une vidange rapide des réservoirs et une pente faible qui se produit normalement entre 3 et 5 jours après la fin des pluies et qui se maintient plus ou moins longtemps et même jusqu'à tarissement complet des cases. Cette dernière correspond bien entendu à une vidange plus lente que celle d'avant. Pour la case de 50 cm de profondeur, il arrive que la cassure soit très peu marquée ou même absente, et on peut alors dire que le régime de vidange suit à peu près une loi exponentielle pour toute la période de tarissement. Mais il n'en est pas de même pour les cases plus profondes, la vidange de celles-ci n'est pas exponentielle, mais on peut la représenter par deux exponentielles successives : la pente de la deuxième droite est beaucoup plus faible que celle de la première, et d'autant plus faible que la profondeur est plus importante. Cela signifie qu'en dessous d'une certaine valeur de réserve d'eau drainable, la décroissance du débit prend une allure moins accélérée qu'avant, cette nouvelle allure s'ajustant moins bien à une forme exponentielle. Autrement dit, entre t_0 où se produit le débit maximum et t_n l'instant où celui-ci tombe à des valeurs extrêmement faibles, il existe un point t_1 qui se trouve au croisement de deux droites, t_1 et t_1/t_n à partir duquel le régime de vidange devient sensiblement plus lent. C'est en examinant les courbes de tarissement à partir des observations enregistrées que nous voyons beaucoup plus clair, ces cassures sur la courbe de tarissement avec le temps en heures en abscisse et le débit exprimé en mm/h en ordonnée.

Nous avons appliqué cette méthode à presque tous les hydrogrammes que nous avons présenté au cours des chapitres précédents. Les figures I - 14 - 1 à I - 14 - 4 présentent l'ensemble de ces courbes.

III. - 4 - 3 Description des courbes

Sur la figure I - 14 - 2, les points expérimentaux de deux cases de 50 et 150 cm sont portés sur le même graphique.

L'origine des temps correspond au 14 février, à 9 heures, et les courbes s'arrêtent le 20 février. Les points concernant la case de 50 cm suivent bien la droite (I) et ceux de la case de 150 cm, la courbe (II). L'hypothèse de vidange exponentielle pour la case 50 cm est donc valable lors de cet épisode (14 février - 20 février), sauf à partir de $q < 0,005$ mm/h : alors, le débit tend à décroître plus lentement, mais nous négligeons cette partie de courbe qui correspond à un écoulement très faible. Le coefficient de tarissement, en considérant $q_0 = 0,17$ mm/h est $\alpha = 0,032$

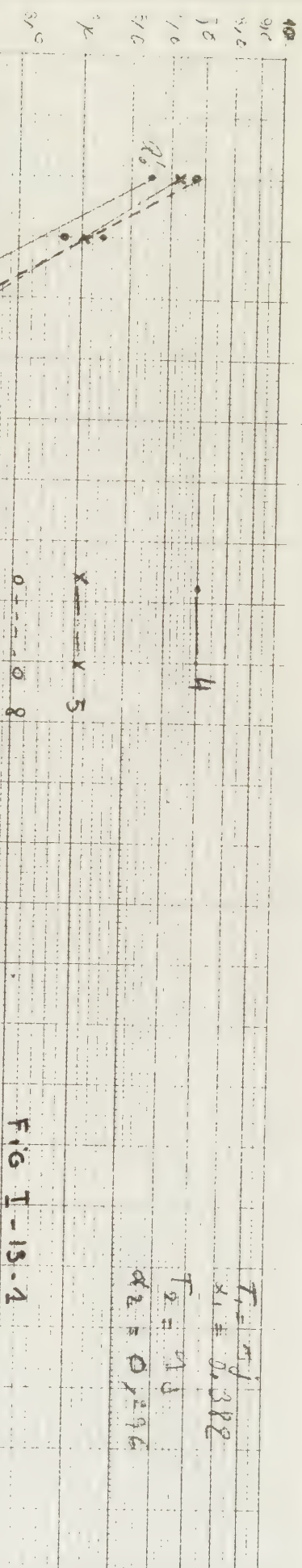
La variation du débit pendant 7 jours de vidange peut être exprimée ainsi :

$$q_{50 \text{ cm}} = q_0 e^{-0,032 t}$$

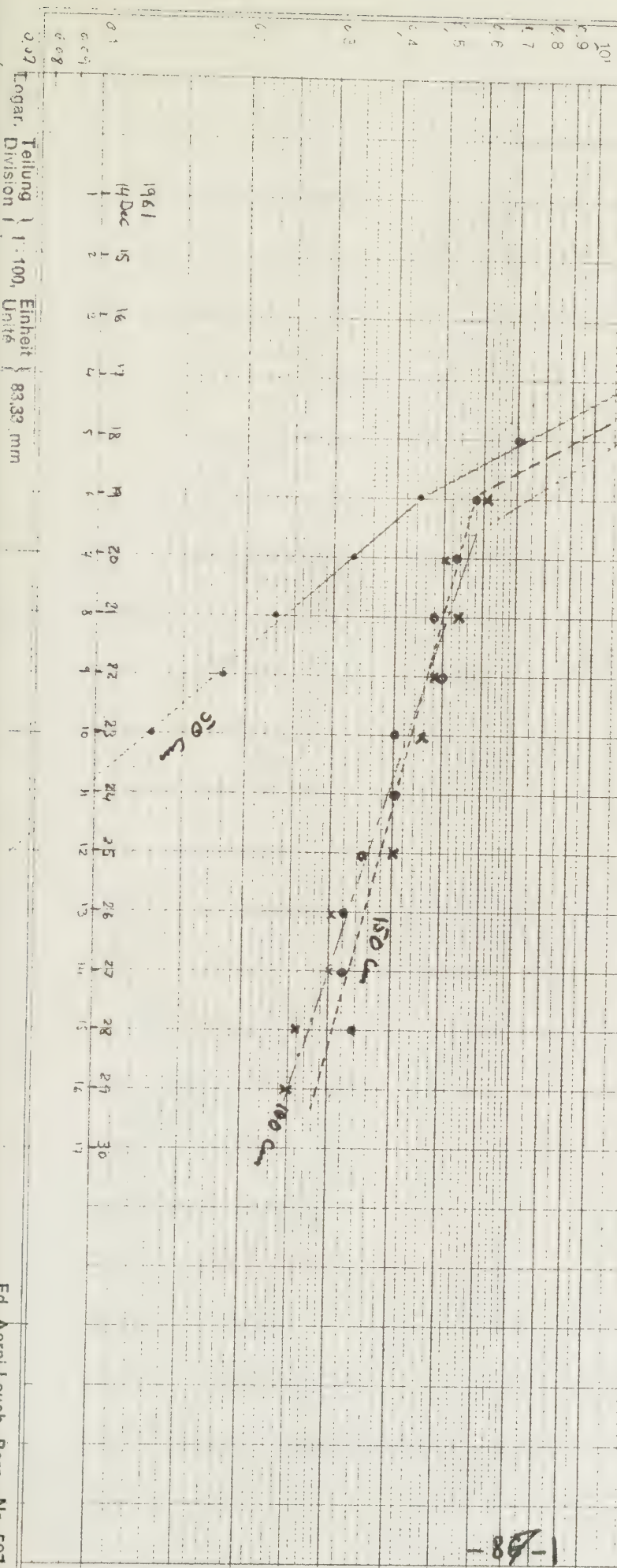
avec t en heures et q et q_0 en mm/h.

Pour la case de 150 cm, le problème n'est pas si simple parce que nous avons vu que les points expérimentaux ne présentent pas non plus une droite, mais une courbe qui pourrait être ajustée approximativement sur plusieurs segments de droite successifs. Nous avons essayé d'adapter cette courbe à trois droites, ayant trois coefficients de tarissement $\alpha_1 = 0,124$, $\alpha_2 = 0,012$ et $\alpha_3 = 0,003$. On pourrait interpréter ces trois coefficients en disant qu'ils expriment trois régimes de vidange qui se succèdent au cours du tarissement. En comparant les coefficients de tarissement des deux cases, on voit que $\alpha_{150} > \alpha_{50}$. Mais α_{2150} et $\alpha_{3150} < \alpha_{50}$, ce qui exprime que la case la plus profonde a un régime de vidange plus rapide, juste au départ et pour quelques heures. Son débit varie ensuite beaucoup moins rapidement que celui de la case de 50, qui continue apparemment de drainer avec un α constant (cf. l'importance des faibles débits dans l'écoulement des cases profondes déjà mise en évidence dans les chapitres précédents). Les résultats sont plus ou moins comparables pour les trois courbes de tarissement correspondant à la période du 23 février au 15 mars 1968. Celle de la case de 50 cm pourrait être ajustée à une, ou à la rigueur à deux droites avec les coefficients α_1 et α_2 , très peu différents l'un de l'autre. Par contre, les courbes des cases de 100 et de 150 cm, comme le cas précédent, présenteraient un régime mixte de vidange. La décomposition de ces différents régimes de tarissement se voit très clairement sur les figures I - 14 - 3a et I - 14 - 3b, où sont présentés deux hydrogrammes complets du drainage pour la période du 1er au 20 novembre 1968 de deux cases de 50 et de 100 cm ; car les points portés sur les graphiques présentent deux droites pour la case de 50 cm et trois pour celle de 100 cm.

Archie



Courbes de tarissement des débits journaliers
de cases lysimétriques
(origine 14 décembre 1961)



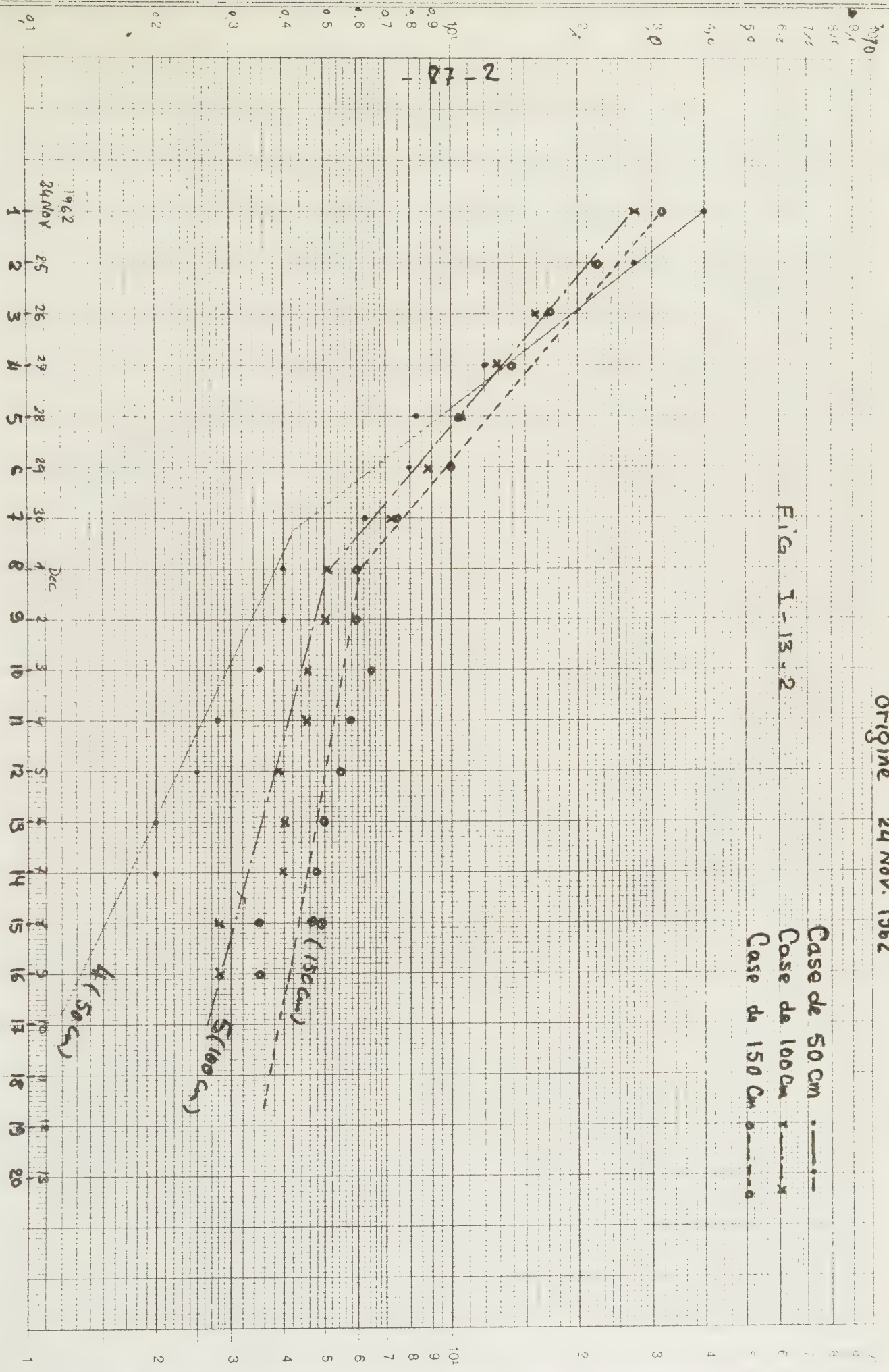
debut en l'air

origine 24 Nov. 1962

Case de 50 cm . —
 Case de 100 cm - - -
 Case de 150 cm

Fig 1-13-2

- 87-2



Teilung } 1-100, Einheit } 83,33 mm
 Logar. Division

débit en l/s

- 88 - 1

Fig. I-13-3

origine 8 Août 1965

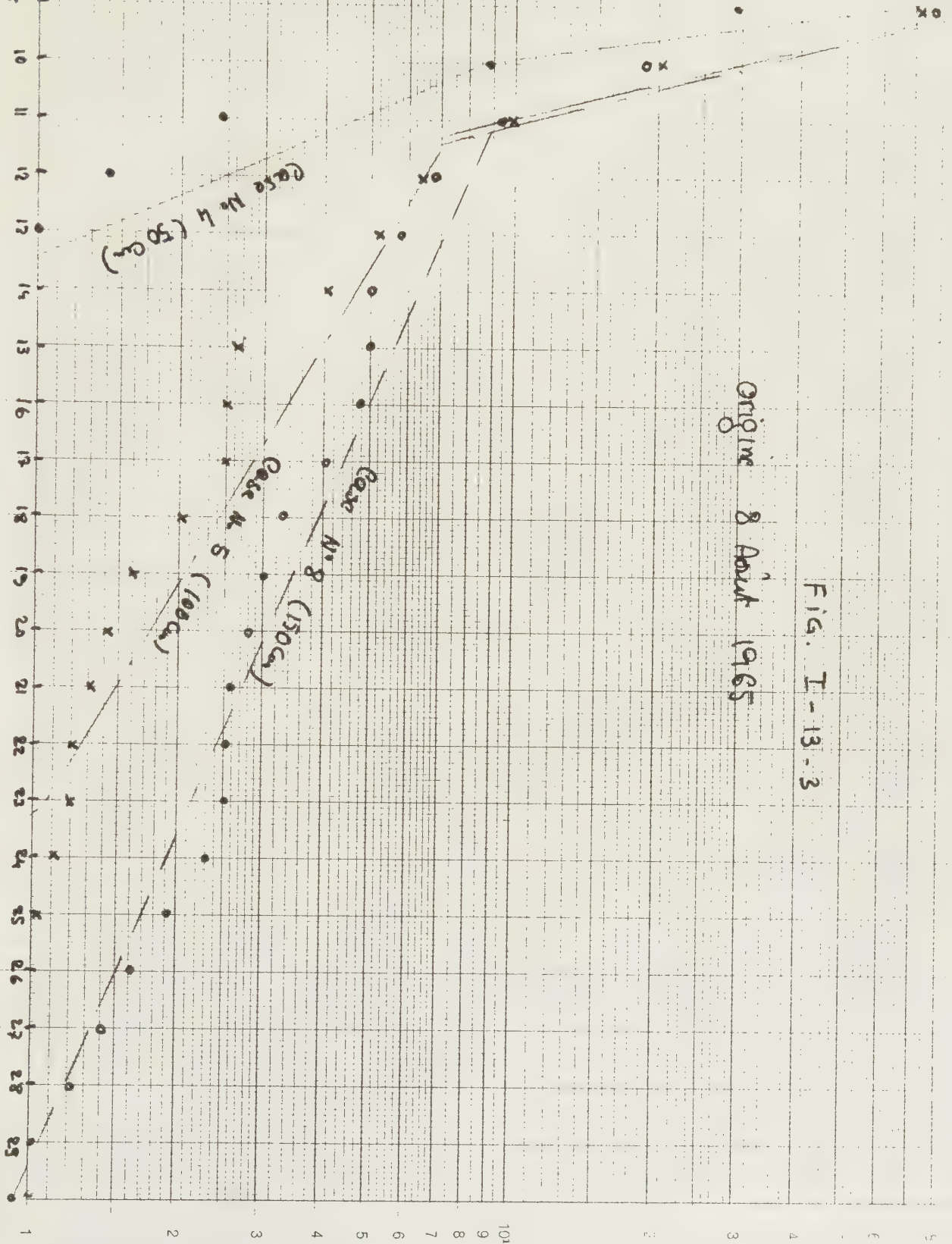
8-8-1965

Case N° 4 (50 cm)

Case N° 5 (100 cm)

Case N° 8 (150 cm)

Logar. Teilung } 1-100, Einheit } 83,33 mm



debit $\frac{e}{s}$

Fig. I-13-4

Courbes de Tanssens et des Caneu

4-9-58
(octobre 1958)

80-2

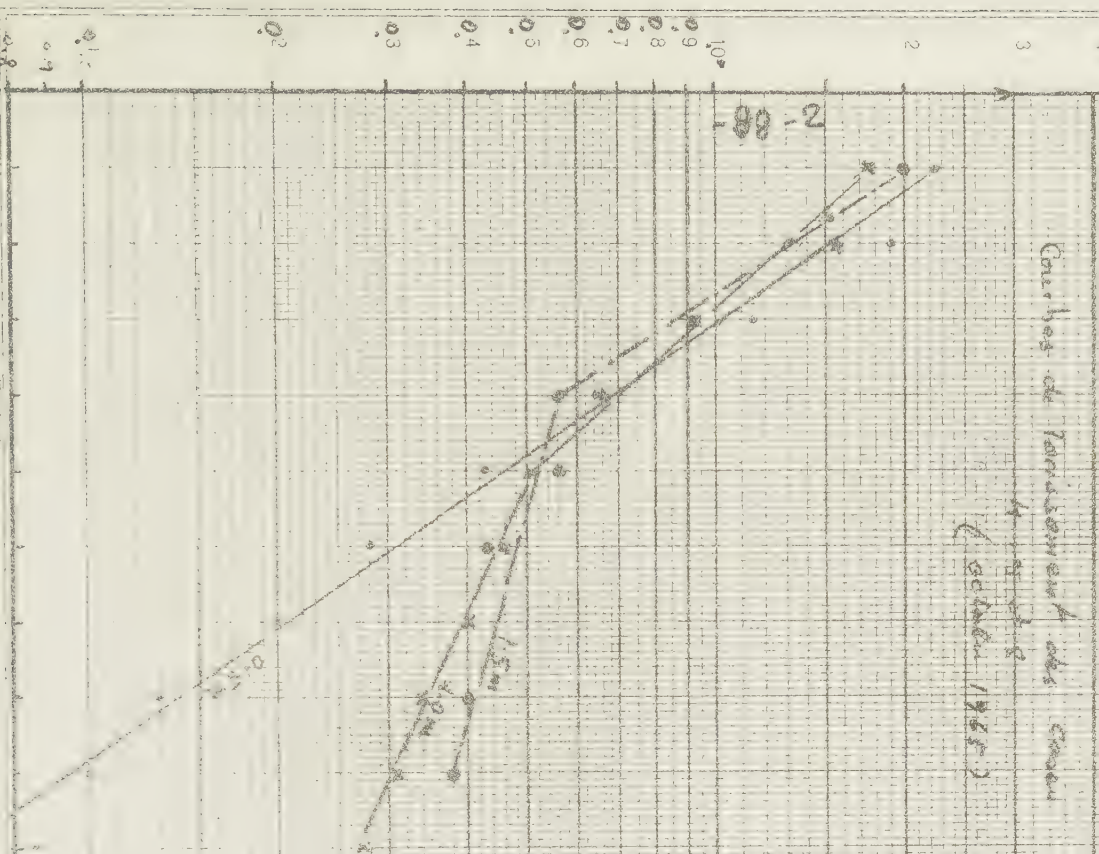


Fig. I-13-5

Origine: 20 juillet 1956

20 juillet 56

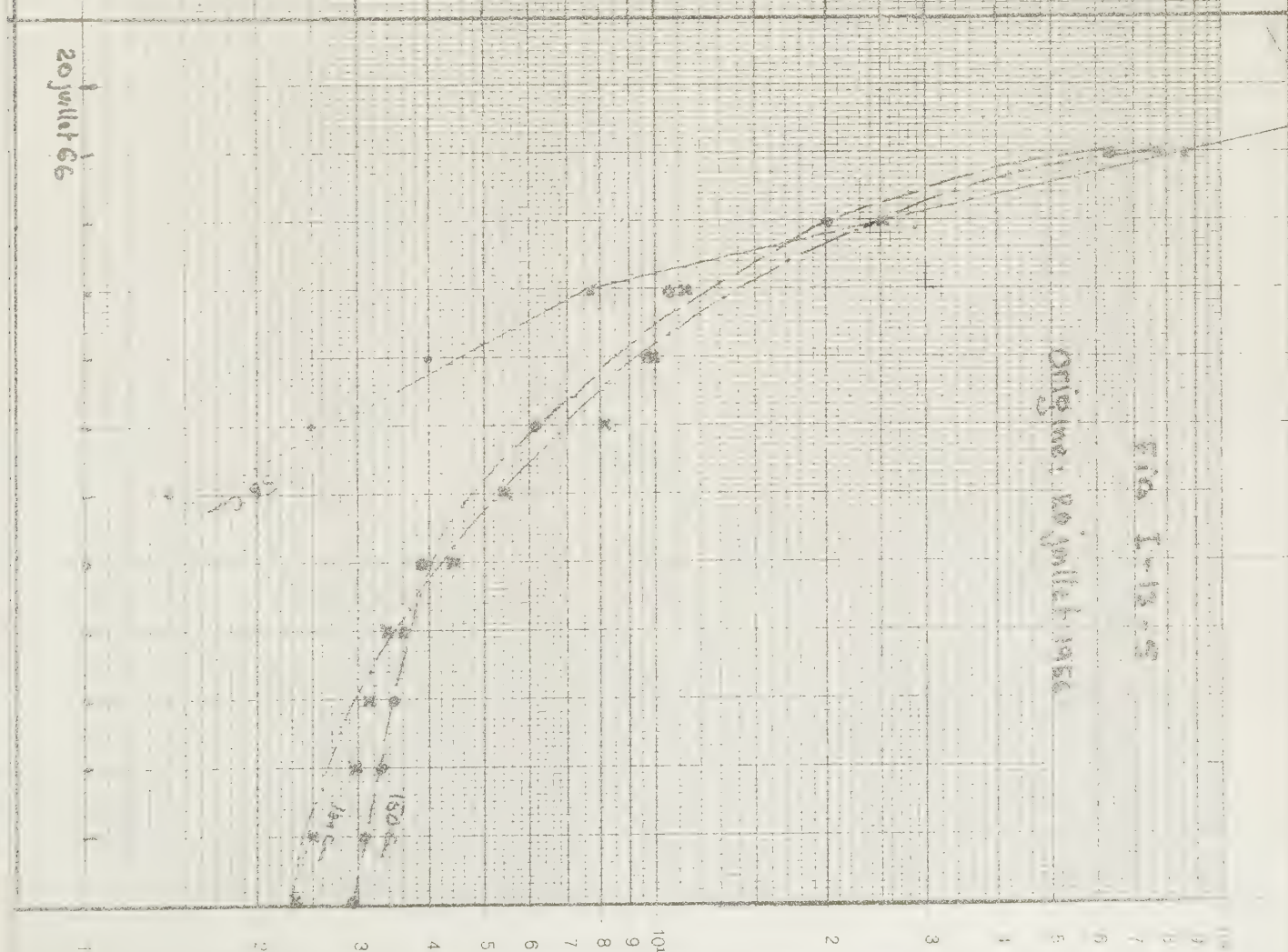
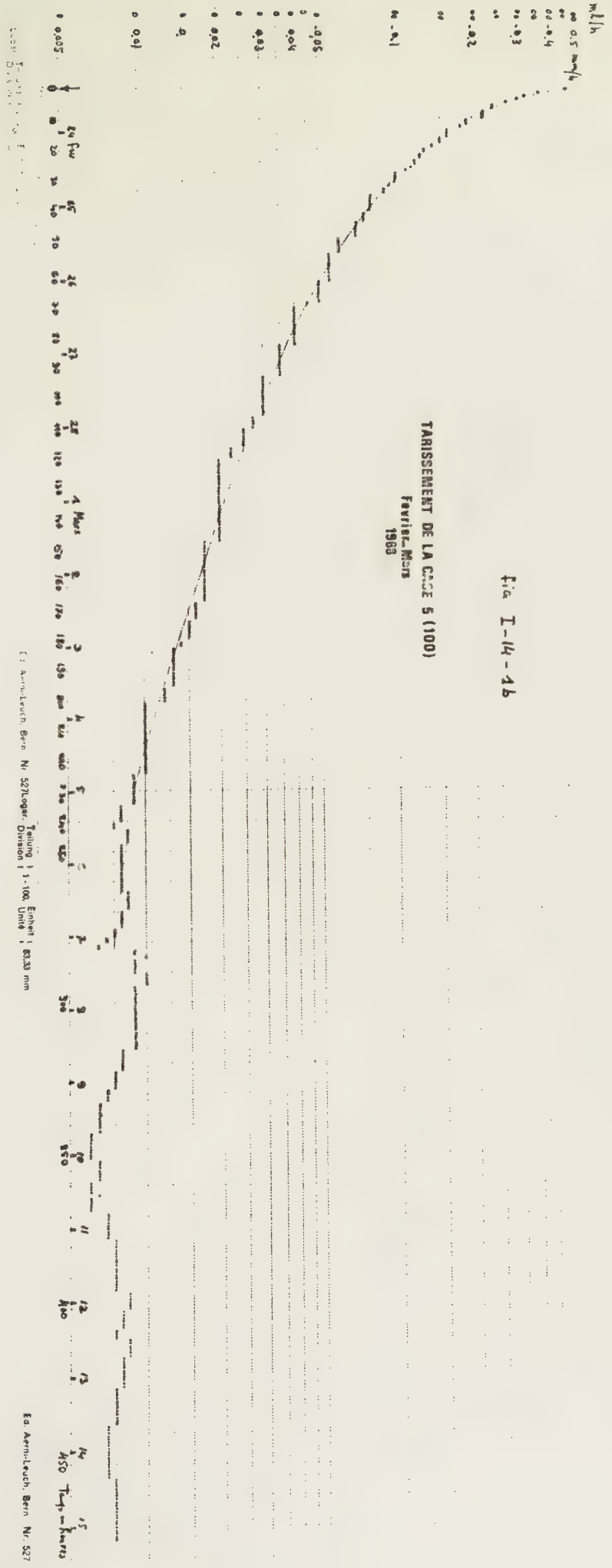


Fig. I-14-4b

TARISSEMENT DE LA CAGE 5 (100)
Favril-Mars
1968



Es. Arm-Leuch. Bern Nr. 527

TARISSEMENT DE LA CASE DE 150 cm
Fevrier-Mars
1969

LES PALIERS SONT REPRESENTANTS D'UNE TRES FAIBLE DECHROISSANCE
DU DEBIT (Le debit a été considéré comme constant sur le graphique)

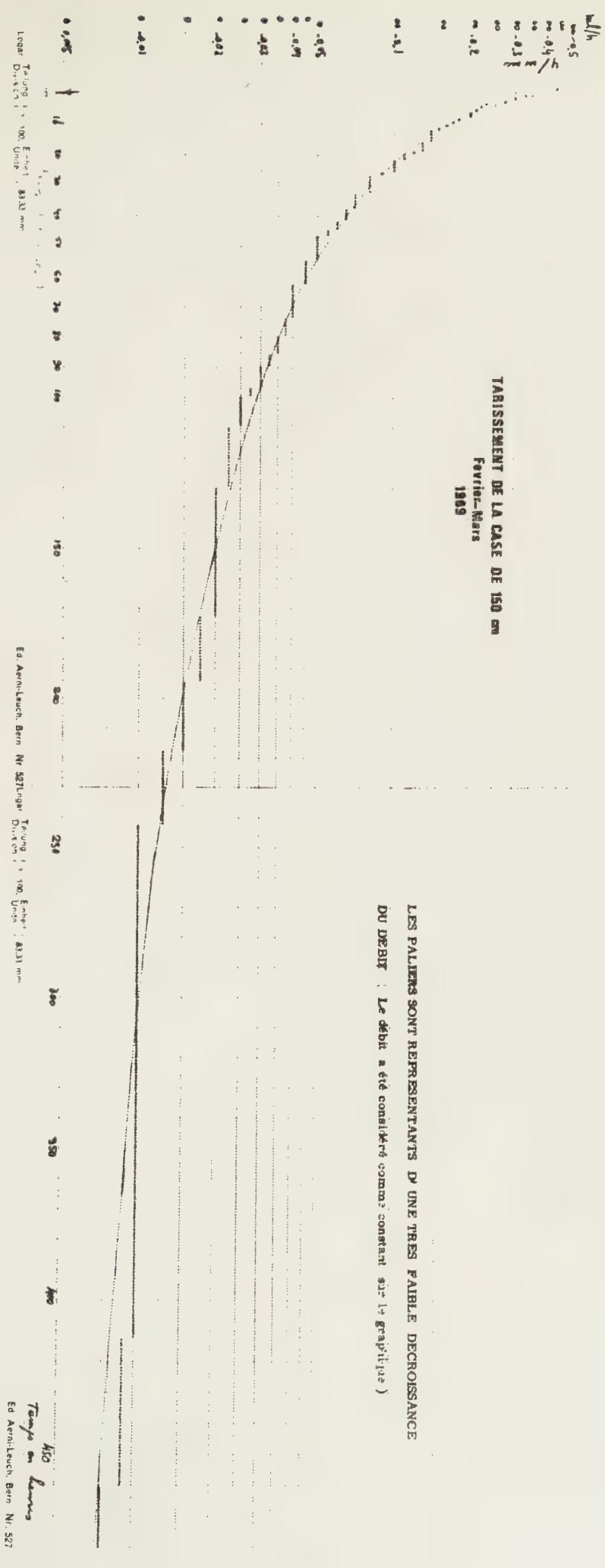


FIG. I-14-2

COURBES DE TARISSSEMENT DES CASES LYSIMETRIQUES

(14 au 20 Février 1968)

No 4 ooo 50 cm
 " 22 150 cm

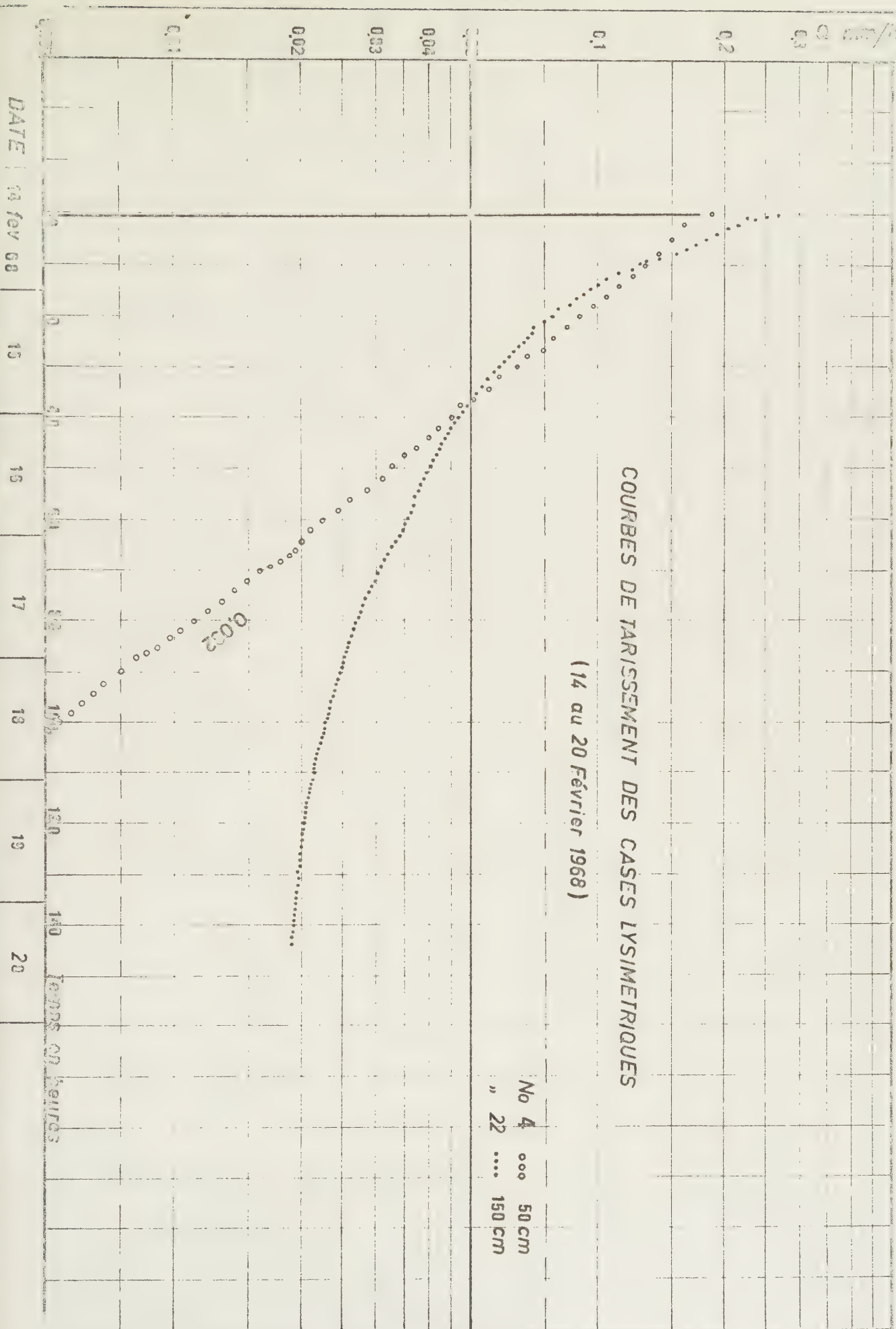
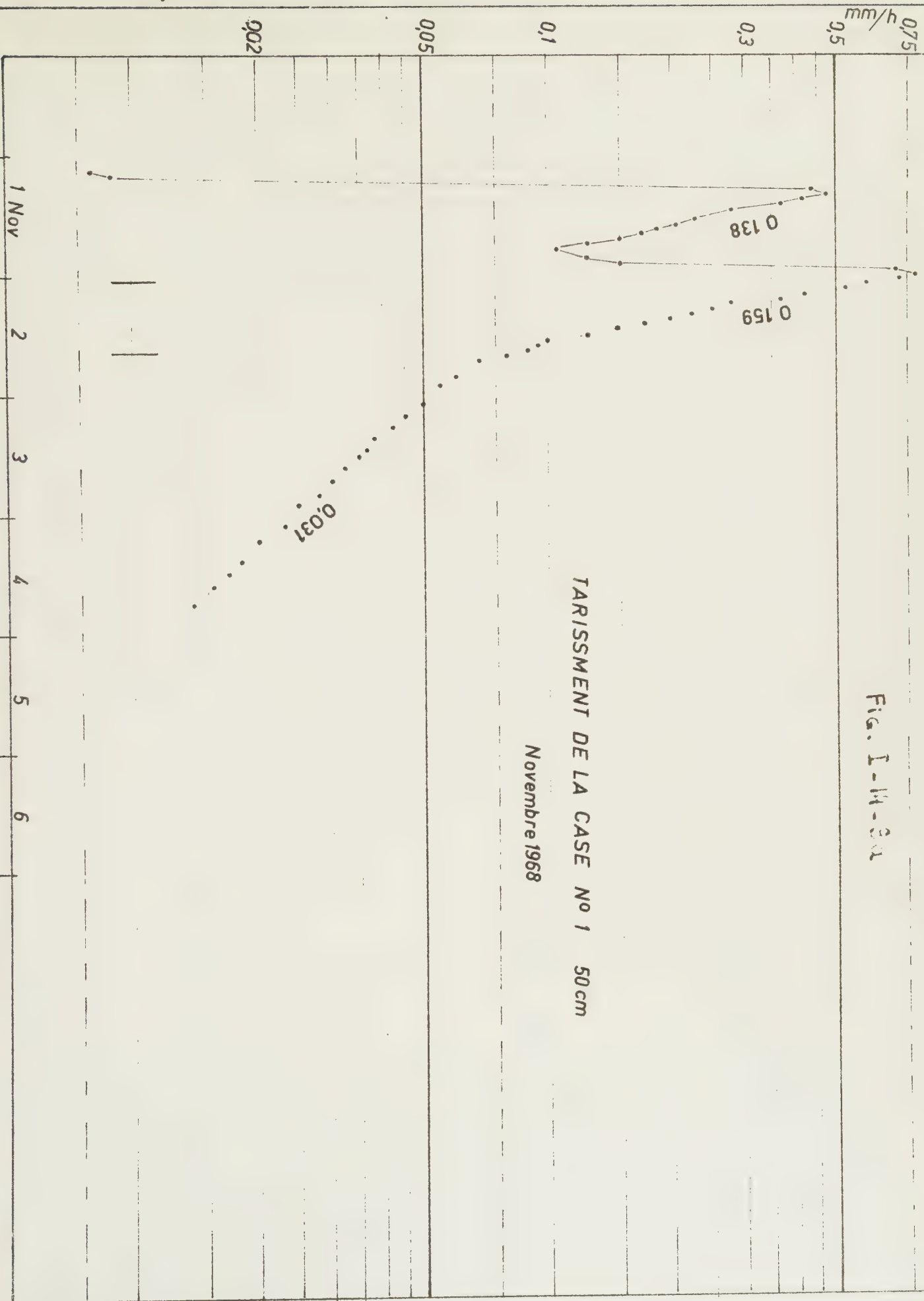


Fig. I-M-2a



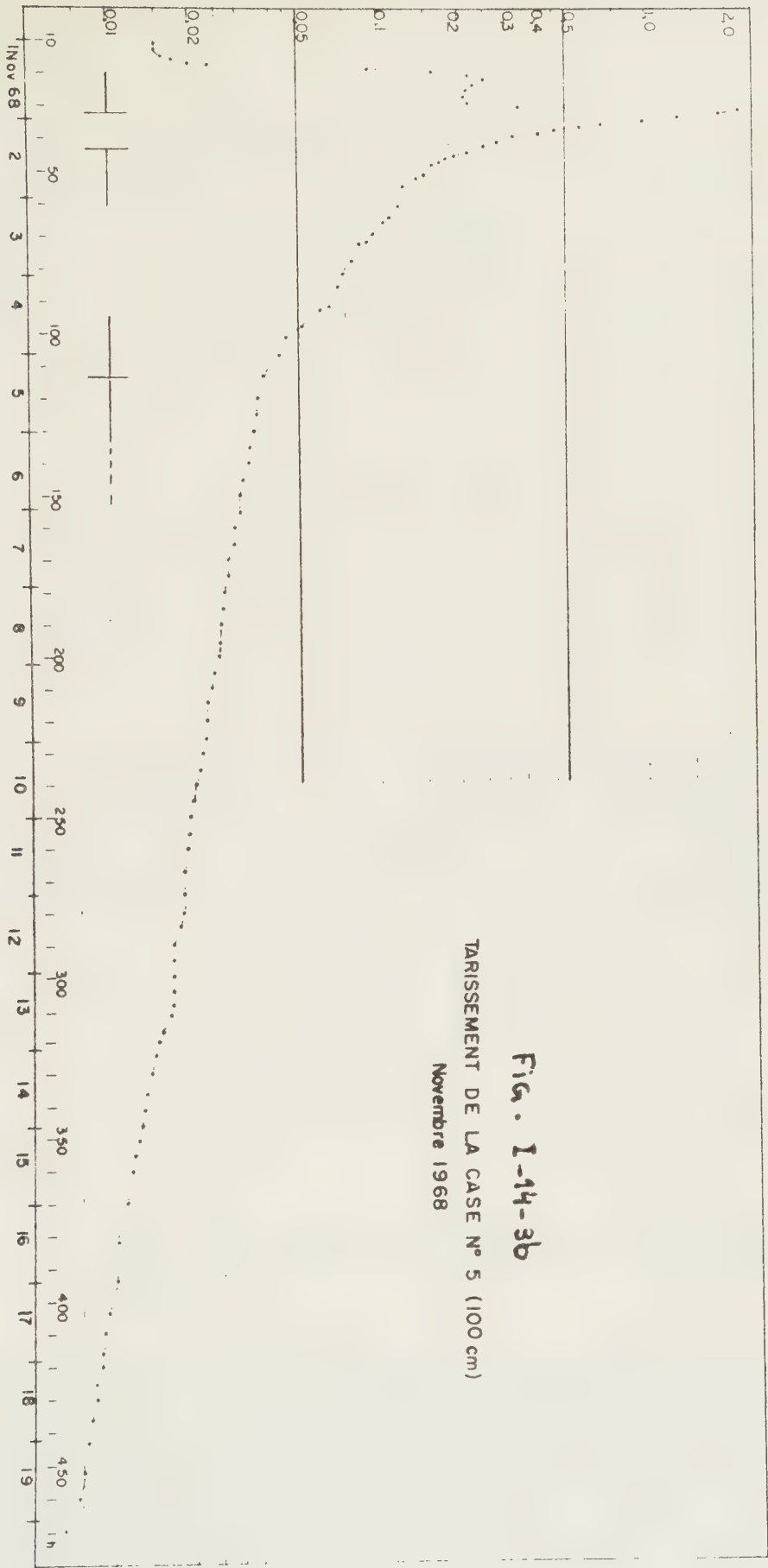


Fig. 1-14-3b
TARISSEMENT DE LA CASE N° 5 (100 cm)
Novembre 1968

Les coefficients calculés d'après les débits maximums q_0 sont les suivants :

Case de 50 cm

2 novembre	0 Heure	$q_0 \quad 1$	= 0,8 mm/h	α_1	= 0,159
2 novembre	16 Heures	$q_0 \quad 2$	= 0,065 mm/h	α_2	= 0,031

Case de 100 cm

1er novembre	22 Heures	$q_0 \quad 1$	= 2,25 mm/h	α_1	= 0,224
2 novembre	9 Heures	$q_0 \quad 2$	= 0,17 mm/h	α_2	= 0,020
5 novembre	7 Heures	$q_0 \quad 3$	= 0,035 mm/h	α_3	= 0,0047

Les mêmes opérations sont effectuées pour la période du 12 au 25 avril 1969. On voit plusieurs courbes de décroissance sur chaque graphique qui montrent les charges successives des réserves pendant cette période. On observe des résultats assez analogues aux précédents. Pour chaque décroissance, un coefficient de tarissement est calculé qui est grosso modo proportionnel à q_0 , le débit maximum correspondant.

III. - 4 - 4 Etude d'ensemble des résultats obtenus dans l'étude du tarissement

Le régime de vidange d'une nappe ou d'un réservoir quelconque est lié, sans doute, au comportement granulométrique et, plus exactement, à la perméabilité et à la porosité de celle-ci. Dans les réservoirs de petites dimensions, comme les cases lysimétriques, la pluviosité, la température et d'autres facteurs climatiques ont également un rôle important. Dans certains bassins de cours d'eau et en particulier lorsqu'ils sont soumis à un climat comportant une saison humide et une saison sèche bien tranchées, on peut observer une courbe de tarissement dont le coefficient est relativement constant (tarissement exponentiel). Ce coefficient est un indice de la perméabilité et de la capacité de rétention du bassin. Dans les

cases lysimétriques, après chaque pluie, il se produit un tarissement et l'intensité des pluies a son effet sur le coefficient de tarissement par l'intermédiaire du débit de pointe. D'autre part, ce coefficient de tarissement varie dans le temps, c'est-à-dire que les pentes de deux courbes de tarissement au droit d'une ordonnée correspondant à un même débit et pour une même case, sont différentes l'une de l'autre. L'exemple peut être donné par la case de 50 cm, le débit étant 0,065 mm/h le 2 novembre 1968 et le 15 avril 1969, le coefficient α a des valeurs respectives de 0,031 et 0,023. Mais, dans certains cas et surtout pour des valeurs de débits très élevés, α reste plus ou moins inchangé d'une période à l'autre. En tout cas, comme le débit q_0 qui est un facteur représentatif de la perméabilité de la couche traversée, le coefficient de tarissement est un indice de la porosité de cette couche ; il y a bien entendu d'autres éléments tels que la température, agissant sur la viscosité de l'eau, sur sa tension superficielle ... dont le rôle est important.

Au cas où la vidange, ou plus exactement le tarissement d'une couche de terre, obéit à une loi exponentielle $q = q_0 e^{-\alpha t}$ en considérant toutes choses égales, par ailleurs, plus les pores sont gros, pour constituer un réseau de canaux plus important pour le passage d'eau, plus α sera élevé et le tarissement sera survenu plus tôt. Dans le cas de notre étude, nous avons vu que seulement la case avec la plus faible profondeur (50 cm) suit parfois une telle loi. Alors, comme il est indiqué, les valeurs de α varient suivant le débit q_0 et bien entendu, les conditions thermiques. En ce qui concerne le cas d'une exponentielle, d'après

$q = q_0 e^{-\alpha t}$, il est facile d'évaluer à un moment donné la quantité d'eau emmagasinée dans la réserve qui est susceptible d'être drainée, c'est-à-dire l'eau contenue dans la macroporosité du terrain et influencée par les forces gravitaires. Si nous prenons V (1) le volume de cette quantité d'eau, on a :

$$V = \int_{t_0}^{\infty} q_1 t = q_0 \int_{t_0}^{\infty} e^{-\alpha t} = \frac{q_0}{\alpha} \left[-\frac{1}{e^{\alpha t}} \right]_0^{\infty}$$

$$V = \frac{q_0}{\alpha}$$

Mais pour les cases plus profondes, et même souvent la case peu profonde, le cas n'est pas si simple et l'évolution du débit pendant une vidange de la réserve se présente comme nous l'avons indiqué, de façon telle qu'on peut

(1) V (volume) ou H (hauteur) suivant que q est exprimé en ml/h ou mm/h

la diviser en deux ou trois phases assez distinctes : par exemple, à partir d'une pluviométrie abondante provoquant une charge élevée, sur la courbe de tarissement, on trouve une double cassure divisant ainsi la droite en trois régimes de décroissance :

1. - Régime avec α très élevé, correspondant sensiblement à une décrue qui ne dure que quelques heures
2. - Régime de décroissance moyen, avec α relativement faible, avec une durée plus élevée que le cas précédent
3. - Régime de décroissance lente, α très faible, avec une durée qui peut s'étendre à plusieurs jours.

Comparons ce qui précède (1, 2 et 3) avec une décroissance qui serait en totalité exponentielle : dans ce cas, α resterait approximativement constante. Or, elle va en décroissant, autrement dit, la décroissance observée à partir d'un instant donné est plus lente que celle qui correspondrait à l'extrapolation exponentielle du segment de courbe qui précède cet instant.

Enfin, après le "3ème régime" indiqué ci-dessus, on constate souvent que le drainage, avant de s'annuler, reste pendant plusieurs jours et même quelques semaines extrêmement faible, cette phase n'est pas exponentielle.

On peut penser que la décroissance des valeurs de α provient de ce que ce sont d'abord les plus gros pores qui se vident, leur épuisement rapide entraînant des valeurs élevées pour α , puis l'eau qui draine provient de pores de plus en plus fins, avec des valeurs plus faibles pour α .

Dans une comparaison entre cases de profondeurs différentes, remplies de façon homogène du même matériau, on pourrait envisager que :

- dans un premier temps, les classes de pores qui prennent successivement une part prépondérante dans le drainage soient les mêmes quelles que soient les cases,
- dans un second temps, le drainage cesserait à peu près dans les cases peu profondes et se poursuivrait dans les autres, alimenté par les systèmes capillaires ayant des "hauteurs d'ascension capillaire" supérieures à la profondeur des "cases peu profondes".

12 Mars 1969	13	14	1	16	17	18	19	20	21
-----------------	----	----	---	----	----	----	----	----	----

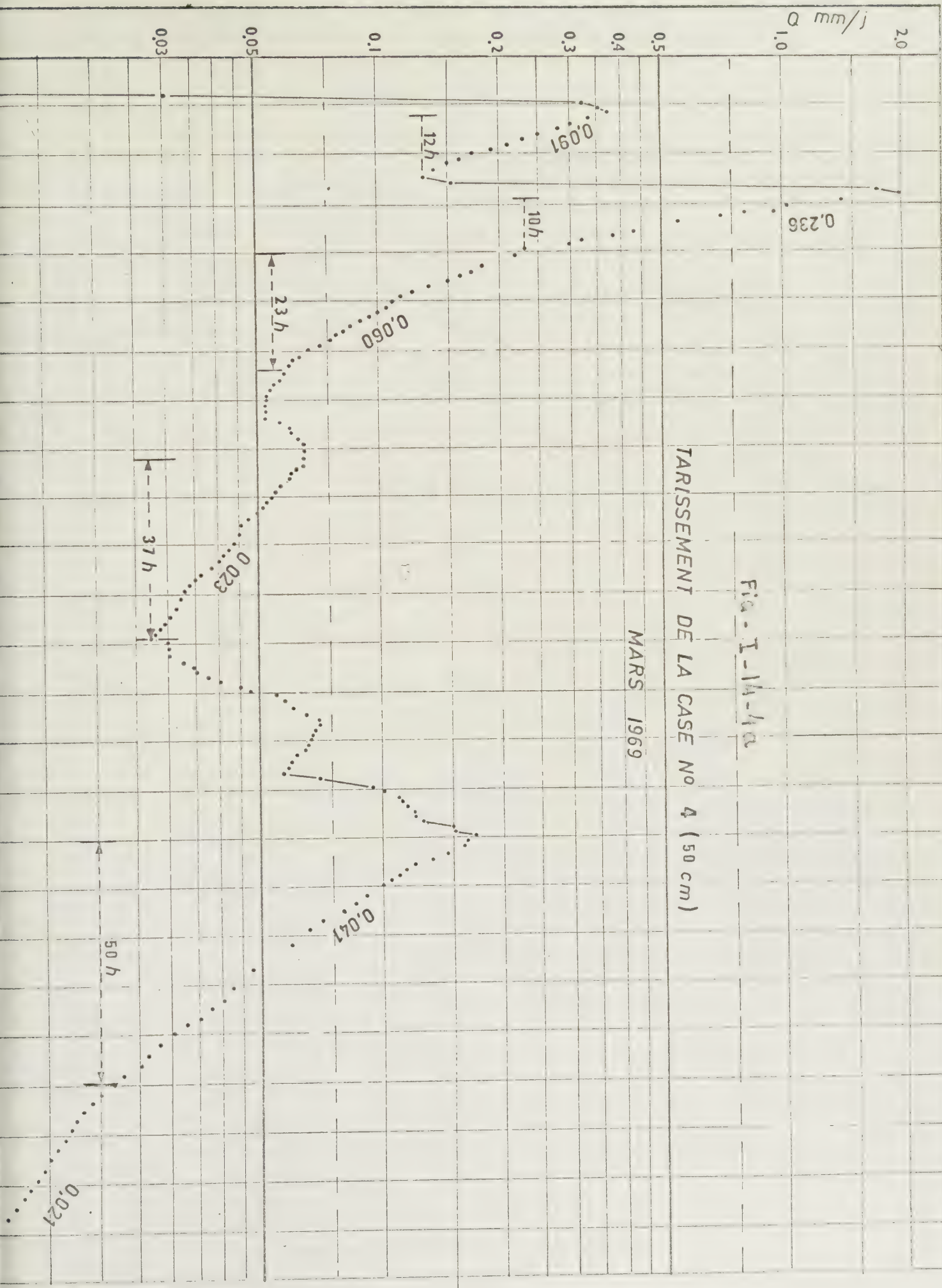


FIG. I-14-1a

TARISSEMENT DE LA CASE N° 4 (50 cm)

MARS 1969

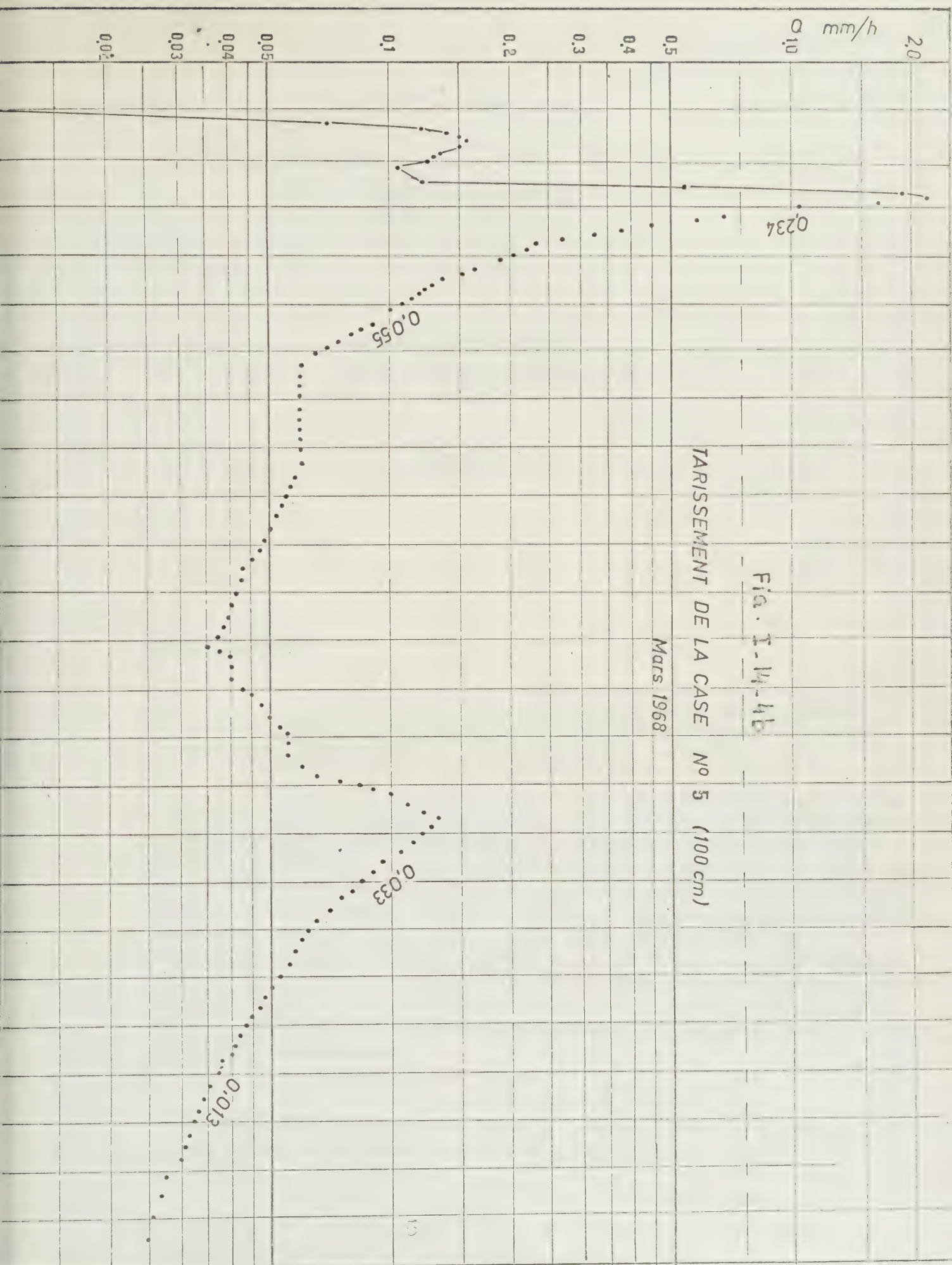


Fig. I-14-4b

TARISSEMENT DE LA CASE No 5 (100 cm)

Mars 1968

DEUXIEME PARTIE

=====

BACS EXPERIMENTAUX

(abrités)

GENERALITES

Au cours des chapitres précédents, nous avons examiné les variations du débit de drainage en fonction du temps pour des cases lysimétriques alimentées par les précipitations naturelles.

Nous avons vu que, dans la plupart des cas, et surtout pour l'étude de la fin de drainage on a été souvent gêné par de nouvelles pluies qui interrompent ainsi le processus de tarissement. Nous avons donc pensé à effectuer certains contrôles sur l'alimentation du sol en eau, cela posant des problèmes sur les cases lysimétriques qui ne recevraient pas que les précipitations et qui sont destinées, bien entendu, aux autres études. Nous avons donc été amenés à installer d'autres dispositifs avec des conditions aussi proches que possible de ce que nous avons déjà utilisé. Pour cela, nous avons construit cinq cuves cylindriques ; nous les avons remplies de terre et arrosées artificiellement. Quant au drainage, il a été enregistré au moyen des mêmes pluviographes qui nous ont servi pour les cases lysimétriques.

Ces dispositifs nous permettent donc :

- de suivre l'évolution du drainage jusqu'au tarissement complet, ce qui n'est pas toujours le cas pour les cases lysimétriques
- d'éliminer ou plus ou moins les facteurs d'évaporation,
- de faire intervenir les conditions d'arrosage qui ne sont pas réalisables spontanément par la pluie,

- de confirmer la validité des résultats de comparaison entre la case de 50 cm et celles de 150 cm, étant donné que parmi les cases peu profondes, une seule case est remplie du même matériau que les cases profondes. D'autre part, les trois cases peu profondes sont groupées à une extrémité des installations et leurs exutoires débouchent à une extrémité du tunnel dans lequel on recueille les eaux de drainage.

Ils présentent également un certains risques :

- ils ne sont pas enterrés, cela peut provoquer des effets thermiques sur les parois latérales. Nous avons protégé ces parois par des plaques isolantes, mais cette protection est imparfaite,

- ils sont installés à l'intérieur d'une serre froide et subissent le microclimat (température, variations de pression), de plus signalons que ces bacs sont utilisés après leur remplissage et dans les mois qui suivent alors que les cases fonctionnent depuis plus de dix ans.

I. - INSTALLATIONS

L'ensemble de ces installations est formé par cinq cylindres en matière plastique dont le diamètre intérieur est de 300 mm. La hauteur de ces cuves que nous appellerons désormais "bacs expérimentaux", varie suivant l'épaisseur envisagée du sol introduit. On a donc :

- deux bacs avec une hauteur totale de 180 cm, la profondeur du sol y est de 150 cm
- deux bacs avec une hauteur totale de 80 cm, l'épaisseur de la couche du sol étant de 50 cm
- un seul bac, avec 100 cm de hauteur totale et 90 cm d'épaisseur du sol.

Chacun de ces bacs est monté sur un support qui facilite son déplacement. Afin d'être à l'abri des précipitations, l'ensemble des appareils a été installé dans une serre aérée, n'ayant aucun dispositif thermique (chauffage, etc...).

Le fond de chaque bac est coupé obliquement avec une dénivellation de 6 cm afin de faciliter le drainage vers la sortie, qui se trouve au point le plus bas du fond. Un tube plastique conduit l'eau recueillie jusqu'à l'appareil enregistreur.

L'intérieur de chaque bac est constitué par deux parties distinctes :

Tableau 2-I-1

Caractéristiques générales des " bacs expérimentaux "

No. du Bac	Hauteur totale cm	Poids vide kg	MATÉRIAUX DE REMPLISSAGE en Kg							Profondeur efficace du sol cm
			FOND DRAINANT				Terre séchée à l'air	EAU		
			Cailloux 1 - 3 cm	Gravier 1 cm	Sable	Eau l.		Remplis- sage	Humec- tation	
I	180	33	20	6	5	5 ⁺	145,0	54,0	2	150
II	180	33,5	20	6	5	4	142,0	52,0	2	150
III	80	21,5	20	3	5	4	47,0	18	2	50
IV	80	23,0	20	3	5	4	48,2	18	1	50

+ : Cette quantité d'eau correspond à celle qui a été utilisée pour immerger le fond drainant avant le remplissage .

1. - Fond drainant

Cette partie qui remplit une hauteur de 20 cm environ dans les bacs profonds, comporte respectivement de bas en haut :

- une feuille de toile métallique,
- une couche de cailloux de diamètres compris entre 1 et 3 mm
- une couche de graviers avec $\phi < 1 \text{ cm}$
- une couche de sable de Fontainebleau.

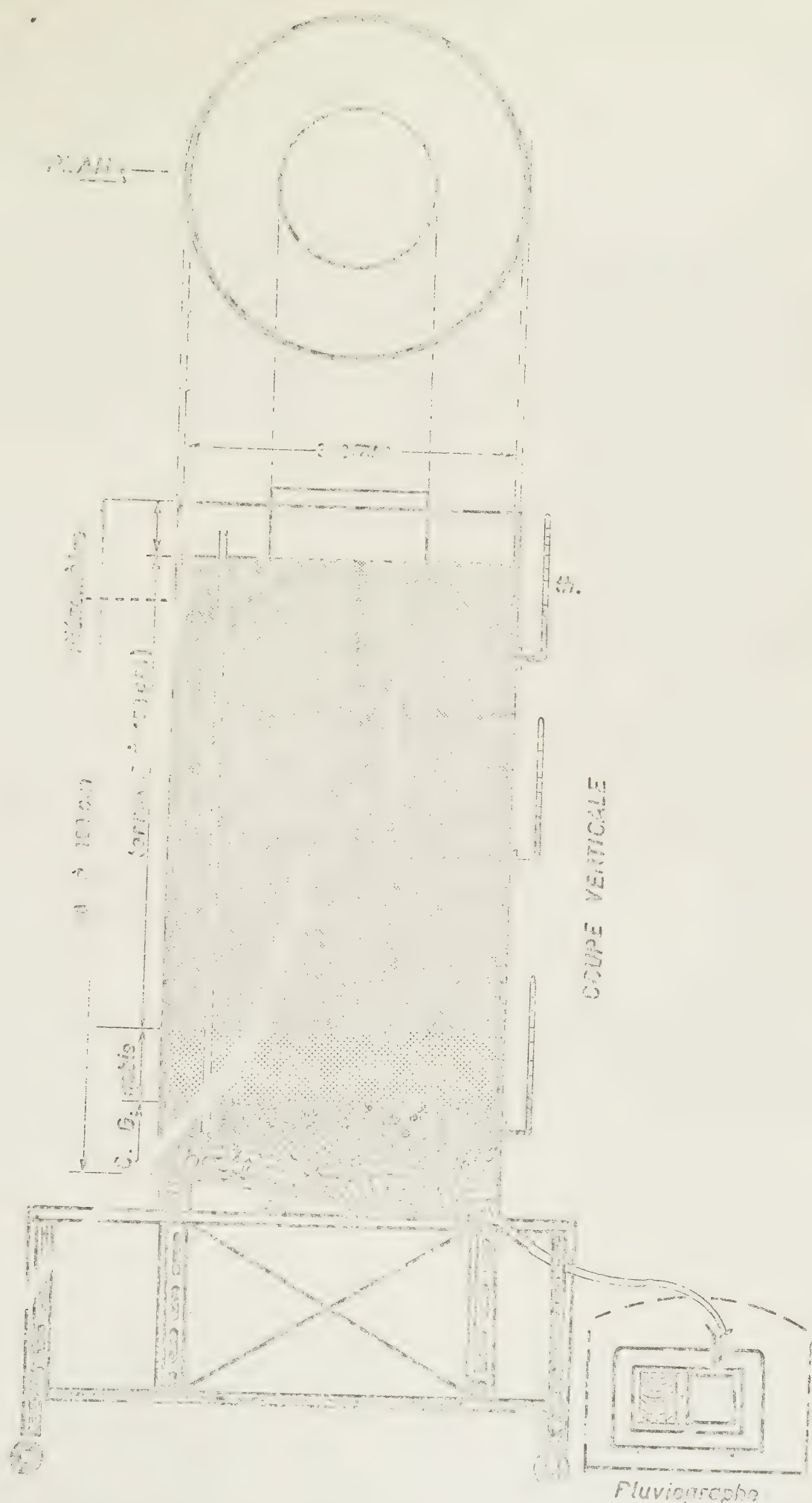
2. - La couche drainante

C'est la hauteur du bac occupée par le sol à étudier, qui constitue une hauteur de 150 cm, 100 et 50 cm suivant les bacs.

Les caractéristiques des bacs et les quantités des matériaux utilisés pour le remplissage sont présentés dans le tableau 2 - I - 1. (sauf pour le bac de 100).

Nous avons introduit en outre 3 à 4 thermomètres coudés dans chaque bac, à différents niveaux du sol, ainsi que dans le fond drainant. Pour diminuer autant que possible les échanges thermiques latéraux, chaque bac a été habillé de plaques isolantes. Il est vraisemblable que cette précaution ne supplée qu'imparfaitement au fait que, contrairement aux cases, les bacs ne sont pas enterrés.

La figure II - 1 présente une coupe verticale d'un bac expérimental.



SCHEMA DE BAC EXPERIMENTAL.

I. - 1 Remplissage

- Sol utilisé -

Le sol utilisé pour le remplissage de ces bacs a été prélevé dans une parcelle située au Centre National de Recherches Agronomiques de Versailles, à une profondeur de 40 à 60 cm. Cette terre a été séchée à l'air avant d'être introduite dans les bacs ; le prélèvement a été effectué en deux fois au même endroit ; le matériau a été soigneusement brassé pour améliorer l'homogénéité. Le tableau 2 - I - 2 ci-dessous présente les résultats des analyses granulométriques de deux prises d'essai :

Tableau 2 - I - 2

Composition granulométrique du sol

Taille des particules		%	
		1ère Prise d'Essai	2ème Prise d'Essai
Argile	$\phi < 2 \mu$	23,69	22,08
Limon fin	$2 < \phi < 20 \mu$	21,25	22,47
Limon gros	$20 < \phi < 50 \mu$	41,44	41,37
Sable fin	$50 < \phi < 200 \mu$	9,94	10,25
Sable grossier	$200 < \phi < 2 \text{ mm}$	1,0	1,14
Matières Organiques		0,80	0,90

La méthode de remplissage est la même que celle utilisée pour les cases lysimétriques : immersion de la terre préalablement séchée ; signalons qu'ici la sécheresse initiale s'est trouvée trop poussée (1,8 d'eau pour 100 de terre), si bien qu'il a fallu réhumecter légèrement la terre avant de la soumettre à l'eau pour limiter la brutalité de l'éclatement, sinon on aurait obtenu une structure trop compacte.

I. - 2 Calcul de quelques paramètres du sol.

Densité, porosité et humidité dans les bacs après le remplissage

La vidange de chaque bac a été déclenchée 24 heures après son remplissage. L'eau gravifique s'est alors écoulée au cours d'une durée qui varie de 6 à 9 jours, suivant la profondeur du bac. La quantité d'eau ainsi drainée a été mesurée à l'aide des appareils enregistreurs.

L'humidité de la terre à la fin de la période de vidange c'est-à-dire la capacité de rétention de la terre dans l'appareil, est calculée, en négligeant l'évaporation (on a cherché à la limiter le plus possible) par la formule :

$$H \% = \frac{(P_R + P_1) - (P_d + P_r)}{P_S} 100$$

H : humidité pondérale en pourcentage

P_S : poids de terre sèche

P_R : poids total de l'eau utilisée pour le remplissage

P₁ : poids de l'eau équivalant à l'humidité initiale de la terre (mesurée par séchage à 105°C) reporté au poids de la terre utilisée

P_d : poids total de l'eau drainée

P_r : poids de l'eau retenue par les matériaux constituant le fond drainant

Densité apparente

Le volume occupé par la terre dans chaque bac est connu, ainsi que le poids de la terre séchée à 105°C utilisée, on a donc :

$$d = \frac{P_S}{V}$$

Porosité

En considérant que la masse volumique réelle de cette terre séchée D est égale à 2,6 (S. Hénin, Profil cultural), le volume occupé par la terre en p.100 sera :

$$V_s = \frac{d}{D} 100$$

le volume des vides, ou la porosité dans le bac est :

$$m = \left(1 - \frac{d}{D}\right) 100$$

L'humidité volumique finale sera :

$$H_v = H_r \times d$$

Le tableau ci-dessous montre les valeurs ainsi calculées pour les quatre bacs expérimentaux.

Tableau 2 - I - 3

Caractéristiques du sol utilisé

BAC N°	Densité Apparente d	Porosité en % de volume	Capacité de Rétention dans le bac	Volume occupé par l'air en %
I	1,35	48	44	4
II	1,32	49,2	42,2	7
III	1,31	49,0	48	1
IV	1,35	48,0	46	2

Nous avons vérifié la quantité d'eau retenue par les différents matériaux qui constituent le fond drainant. Les mesures effectuées en laboratoire ont montré que les cailloux retiennent environ 0,6 % d'eau, ce qui nous donne une quantité totale de 120 ml pour 20 kg de cailloux se trouvant à l'intérieur de chaque bac expérimental. De même, le gravier a une capacité de rétention de 1,8 %. Ce volume d'eau retenu par 6 kg de gravier atteint 108 ml qui est également négligeable. En ce qui concerne le sable, les mesures ont été effectuées sur deux échantillons de 2 et 4 cm d'épaisseur, l'eau gravitaire étant évacuée au bout de deux heures. Si on adopte 23 % d'eau retenue par le sable, 5 kg de sable sec dans des bacs retiendront un volume de 1,15 l d'eau. C'est une quantité faible par rapport à l'humidité totale du bac ; il est vraisemblable que cette humidité du sable varie peu au cours du temps (une couche de 4 cm de sable humide n'a pas donné d'écoulement détectable après deux heures de ressuyage). Néanmoins, on peut se demander si l'interposition de cette couche de sable (entre la terre et les matériaux très grossiers situés plus bas) ne modifie pas quelque peu la courbe de tarissement.

II. - EXPERIENCES - ETUDE DU DRAINAGE

Ving-quatre heures après le remplissage de chaque bac, nous avons ouvert la sortie pour que l'eau accumulée dans le fond et l'eau excédentaire à la capacité de rétention de la couche drainante soient drainées.

C'est cette phase, dans laquelle la terre est initialement submergée complètement que nous nommerons maintenant "vidange".

Le débit de vidange a été enregistré et nous avons établi les courbes de ce débit. La durée nécessaire pour que toute l'eau gravitaire soit évacuée, s'élève de 5 à 12 jours suivant l'importance de la profondeur de la couche drainante (1). Au cours de ce temps, à la suite d'un tassement, le niveau de terre a baissé environ de 5 à 7 cm dans les bacs peu profonds et de 10 cm dans ceux profonds. Ce tassement a porté l'épaisseur de la couche drainante à 50 et à 150 cm environ. A partir du 23 juillet 1968, où les 4 bacs ont été mis en service, nous avons effectué toute une série d'arrosages successifs. Il faut rappeler que le but essentiel de ces opérations était l'étude du tarissement de la couche du sol ; nous avons donc choisi la quantité d'eau pour l'arrosage de façon à ce qu'elle provoque un drainage assez important. Les arrosages ont été effectués avec des moyens très simples et sur une partie de surface limitée par un cylindre pour empêcher la circulation rapide de l'eau à travers les fissurations provoquées par le décollement de la terre des parois des bacs. Tout comme dans l'étude des cases lysimétriques, les arrosages fournissent une série d'hydrogrammes du drainage, dont les différents composants sont présentés dans les tableaux ci-après.

(1) Voici pour exemple les quantités d'eau drainées par jour au cours de vidange de deux bacs : N° I (150 cm) et N° IV (50 cm)

	BAC N° I		BAC N° IV	
Premier jour	11.800 ml	169 mm	6.080 ml	87 mm
Deuxième jour	2.400	34	80	1
Troisième jour	800	12	80	1
Les 3 jours suivants	760	11	140	2
Les 3 jours suivants	600	9	nul	0
Le jour suivant	nul	0	nul	0

II. - 1 - Courbes de vidange des bacs après le remplissage

Au cours de la première heure de vidange, la quantité d'eau évacuée des bacs est de l'ordre de 4,3 à 4,9 litres. Cette quantité correspond en grande partie à celle qui avait rempli le fond drainant (3 à 4 litres, soit environ 50 mm) et qui est drainée au cours de quelques minutes seulement. Une fois drainée l'eau qui remplissait ainsi le milieu grossier, le débit tombe rapidement à des valeurs assez faibles.

Au cours de la vidange des quatre bacs, nous avons observé un phénomène qui s'est produit presque toujours au cours du tarissement des bacs profonds, mais qui n'a pas été remarqué dans les cases lysimétriques. Il s'agit d'oscillations approximativement périodiques du débit du drainage dont la période est de 24 heures. Les graphiques II - 2 - 1 et II - 2 - 4 présentent les quatre courbes de vidange des bacs. On remarque que ces variations diurnes ne sont pas aussi importantes dans les bacs peu profonds que dans les profonds. D'autre part, il est assez difficile d'interpréter une telle variation. Etant donné que le débit du drainage des bacs peut être influencé par la température, nous avons présenté sur les graphiques la courbe de variations de la température journalière pour les mêmes périodes de vidange (température de l'air sous abri ; la température maximum dans la serre est certainement bien supérieure aux valeurs présentées sur le graphique). D'après les graphiques exposés (graphiques II- 2 - 1 à II - 2 - 4), il semble que la courbe de débit du drainage subit plus ou moins les variations de la courbe de température journalière, c'est-à-dire qu'à chaque T maximum correspond un débit maximum, on peut avoir un décalage d'une ou deux heures. D'après nos observations, la température à l'intérieur des bacs, dans la terre, varie peu au cours de la journée ; l'amplitude de ces variations pour la terre dépasse rarement 2 ou 3 °C ; elle est un peu plus élevée dans le gravier du fond drainant ; de telles variations de température n'entraînent que de faibles variations de viscosité de l'eau ; cet effet de viscosité semble donc très insuffisant pour expliquer les fortes variations de débit observées, peut-être les variations de tension superficielle joueraient-elles un rôle plus important (voir troisième partie).

II. - 2 - Analyse des hydrogrammes du drainage de différents arrosages

Etant donné que les bacs étaient à l'abri des précipitations naturelles, ils ne recevaient aucune alimentation en cours de tarissement ; chaque arrosage (instantané ou étalé dans le temps) est effectué après l'épuisement du drainage relatif à l'expérience précédente, c'est-à-dire au moment où le drainage journalier est inférieur à 10 ml correspondant à 1/7 de mm (le tarissement est considéré comme survenu quand il y a moins d'un basculement du pluviographe au cours de 48 heures, correspondant à 10 ml/j). Notons que les pluviographes ont été couverts pour réduire le plus possible l'évaporation de l'eau emmagasinée dans les augets ; à ce sujet, nous avons vérifié à l'aide de récipients placés dans les mêmes conditions que cette évaporation est négligeable. Les variations du débit en fonction du temps prennent à peu près la forme habituelle des hydrogrammes ayant une courbe de montée, un débit de pointe et une courbe de décroissance. Analyse et comparaison de ces hydrogrammes concernant les bacs de profondeurs différentes montrent que :

1. - Le temps de réponse ou l'intervalle de temps entre le début de l'arrosage et les premières gouttes du drainage croît avec la profondeur. Il varie de 15 minutes à une heure, de 30 minutes à 2 heures et d'une heure à 11 heures respectivement pour les bacs de 50, 100 et 150 cm, les valeurs faibles correspondant à l'arrosage échelonné dans le temps et les valeurs plus élevées aux arrosages intenses (voir tableau 2 - II - 1 représentatif de différents arrosages).

2. - Le débit maximum est plus grand dans les bacs moins profonds, ses valeurs extrêmes sont de 560 ml/h (8 mm/h) pour le bac de 50, 300 ml/h (4,3 mm/h) pour celui de 100 et seulement 100 ml/h (1,4 mm/h) pour le bac de 150 cm ; contrairement aux cases lysimétriques dont les plus profondes présentent un débit de pointe plus élevé. Le débit maximum survenu environ 2 heures après la réponse dans les bacs peu profonds reste presque constant pendant plusieurs heures dans le cas où l'arrosage est effectué avec une quantité importante répartie sur quelques heures. Dans les bacs plus profonds, la montée est très peu accentuée et le débit maximum est également assez mal défini.

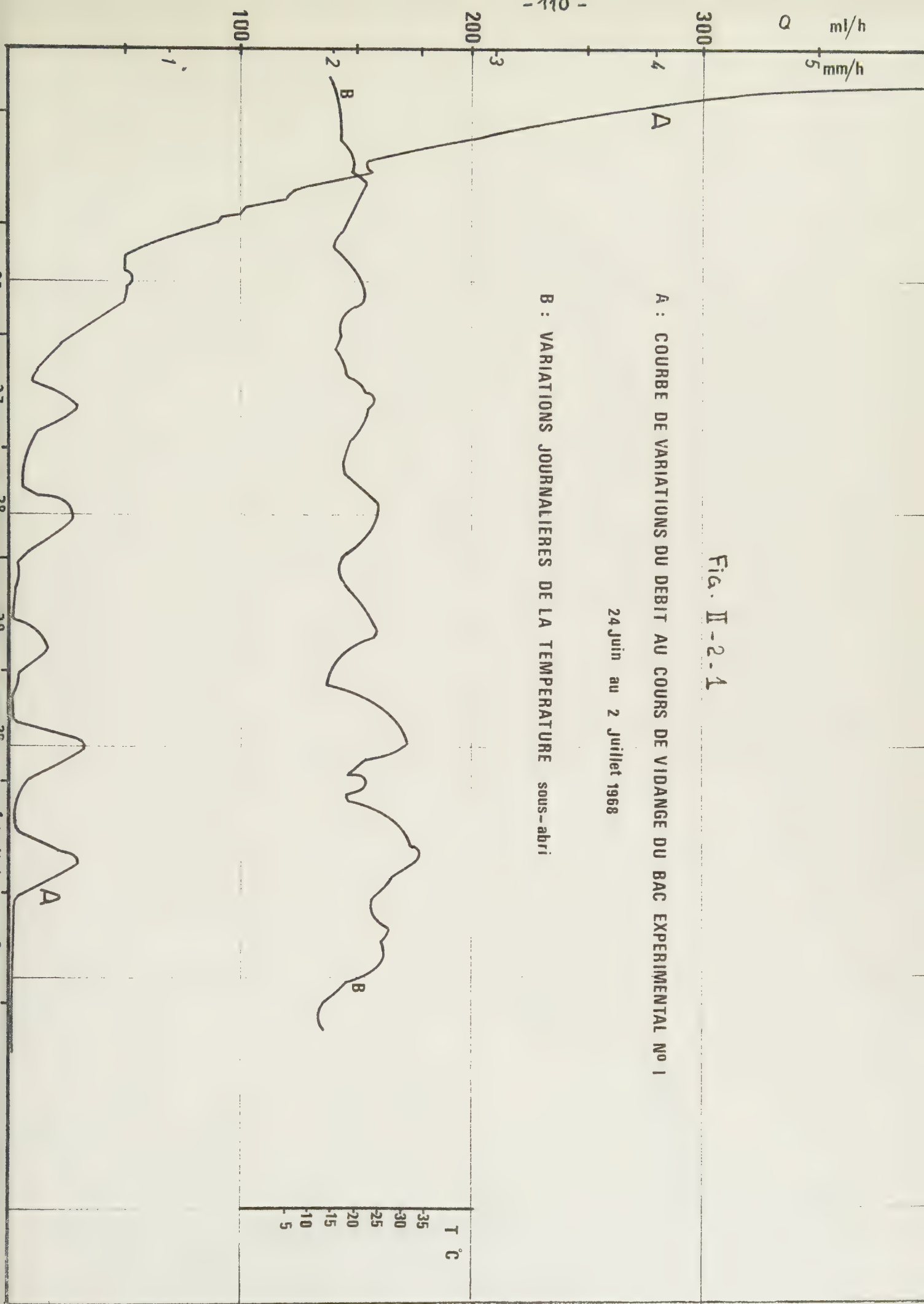
3. - La durée totale du drainage ou l'intervalle de temps entre l'apparition du drainage et son épuisement ($q < 1/7$ mm/j) varie elle aussi, suivant la profondeur et, bien entendu, la quantité d'eau reportée, ainsi que la température. L'amplitude de ces variations est de

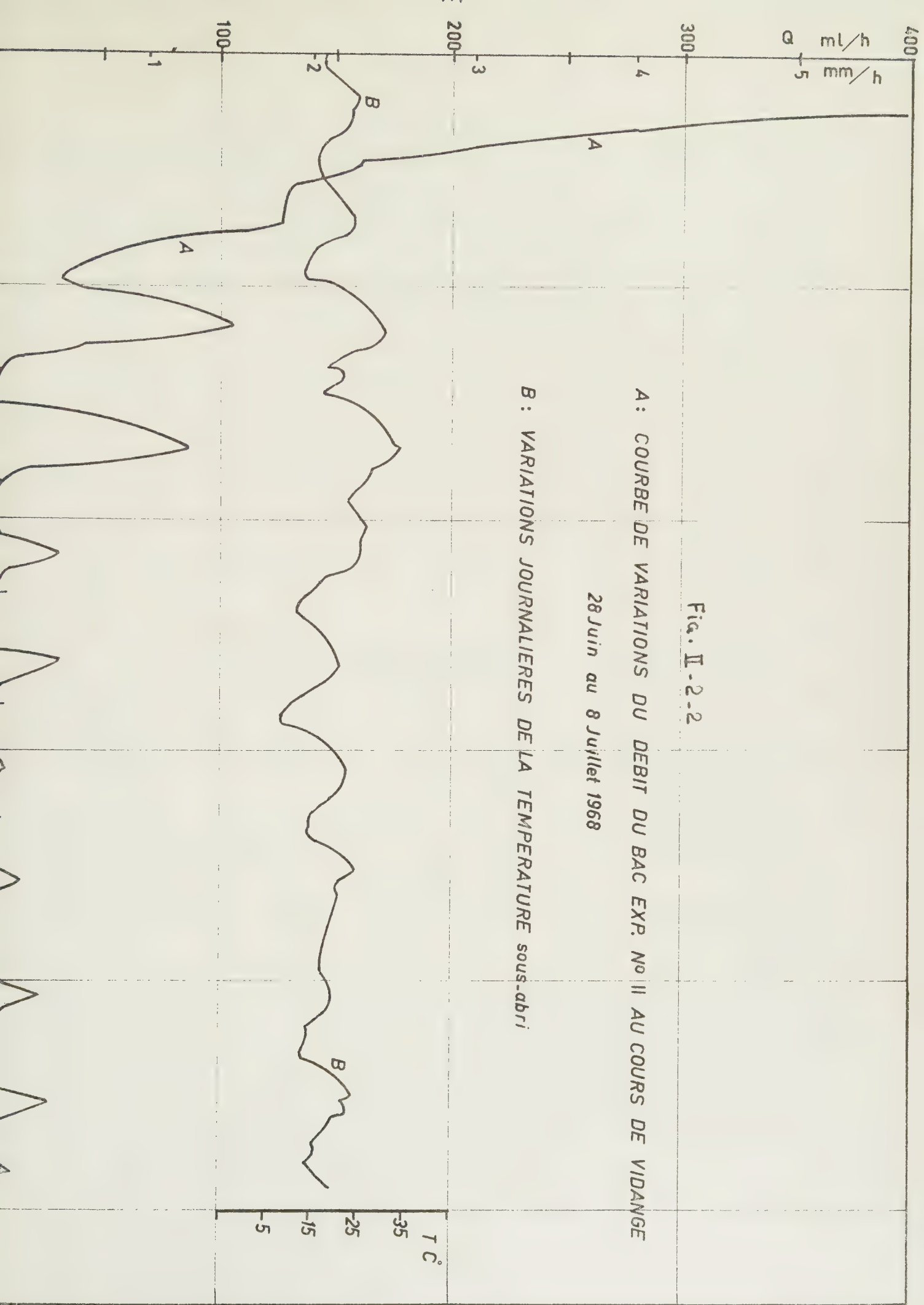
. 30 heures à 7 jours pour les bacs de 50 cm

Fig. II - 2.1

A : COURBE DE VARIATIONS DU DEBIT AU COURS DE VIDANGE DU BAC EXPERIMENTAL N° 1
24 Juin au 2 juillet 1968

B : VARIATIONS JOURNALIERES DE LA TEMPERATURE sous-abri





(Tableau 2-II-2)
Caractéristiques de différents arrosages dans les "bacs expérimentaux"

Bac N°	Vr ml	H mm	Durée h	Tr h	Vd ml	H mm	q _M ml/h	Date de l'arrêt	D h	T ₂₅ h	T ₅₀ h	T ₇₅ h	T _{87,5} h
1	1400	20	2	5	1120	16	100	27-7-68	90	9,5	18,5	35	52
	"	"	"	"	1120	16	42	26	60	8	18,5		
	"	"	"	0,5	1200	17,1	340	25	44	1,5	2,5	3,5	4,5
	"	"	"	0,5	1280	18,2	215	25	45	2	3,5		
2	2000	28,5	2	1	2060	29,4	90	29-7-68	90	7,5	16,5	32	48
	"	"	"	2,5	2060	29,4	65	29	85	7	23		
	"	"	"	0,25	1820	26	340	28	65	1,75	3	5	6
	"	"	"	0,50	1960	28	220	28	65				
3	2000	28,5	2	3	1320	18,8	60	25-8-68	50	6,5	15,5	23	28
	"	"	"	4,5	1400	20	55	26	90	14	21		
	"	"	"	1,25	1700	24,25	260	25	65	2,5	4,25	6	10
	"	"	"	1	1800	25,75	160	24	65	3	5		
4	1400	20	6	5	1260	18	60	30-8-68	95	7,5	14	27	36
	"	"	"	5	1080	15,2	35	30	97	10	20		
	"	"	"	1	1280	18,3	320	28	52	2	4	5	6
	"	"	"	1,5	1260	18	170	28	55	2,5	4,5		
5	1400	20	8	6	1220	17,4	40	5-9-68	95	10	20,5	40	55
	"	"	"	11	1260	18	30	5	100	13	24		
	"	"	"	1	1270	18,2	300	3	65	1,5	2,5	4	5,5
	"	"	"	1	1200	17,2	140	3	70	3	5		
6	1400	20	7	4,5	1160	16,6	40	10-9-68	95	9	20	45	63
	"	"	"	6	1200	17,25	40	10	95	15,5	25,5		
	"	"	"	0,5	1320	18,8	400	8	75	1,5	2,5	4	5,5
	"	"	"	0,5	1260	18	150	8	65	2,5	4,5		
7	1400	20	7 ³ / ₄	6	1000	14,3	45	16-9-68	115	8	19	41	62
	"	"	"	6,5	1160	16,6	30	16	120	15	26		
	"	"	"	0,75	1290	18,4	220	14	50	2	3,5	5,25	6,5
	"	"	"	1	1460	20,8	150	14	50	3	5,5		
8	1000	14,3	3	8	760	10,85	20	20-9-68	95	11,5	21,5	45	59
	"	"	"	11,5	760	10,85	30	20	98	16	24		
	"	"	"	1,25	800	11,4	200	17	30	2	3	4,5	5,75
	"	"	"	1,5	860	12,3	115	18	50	2,5	5		

(Tableau 2-II - 1) suite

Bac N°	Vr ml	H mm	Durée h	Tr h	Vd ml	H mm	qm ml/h	Date de l'arrêt	D h	T ₂₅ h	T ₅₀ h	T ₇₅ h	T _{87,5} h
I 1900	27,2	5,75	3	1620	23,5	56	25-9-68	125	10	20	41	62	
II 2000	28,6	7	3	1600	22,8	50	25	115	11	23			
III 2000			1/4	1560	22,2	400	23	60	1,5	5,25			
IV 2000			1/4	1540	22,0	260	23	55	1,75	5			
I 2000	28,6	7	4	1950	27,9	60	30-9-68	125	12	24	44	59	
II 2000			4	1840	26,8	60	30	115	14	26			
III 2000			1/6	2000	28,6	480	27	40	1,75	7,25	6,5	8	
IV 2000			1/4	2000	28,6	400	27	60	2	7,25			
I 2000	28,6	5	5	1800	25,7	45	7-10	150	23	38	60	85	
II 2000			5	2000	28,6	50	7	155	23	36,5			
III 2000			1/4	1940	27,7	420	4	75	1,5	24	9,5		
IV 2000			1/2	2000	28,6	420	4	85	1,5	24,5			
I 1730	24,7	5	6	1760	25,2	55	14-10	165	12,5	22	42	62	
II 1615	23,1	5,3+	6	1760	25,2	45	14	170	16,5	29			
III 1615		6,9	1	1770	25,3	280	10	70	2	4	6,5	8	
IV 1615			1/2	1750	25	240	10	70	2,5	5			
I 1615		5,3+	7	1610	23	30	21-10	175	23	35			
II 1615		6,9	9	1600	22,85	30	21	180	23	43			
III 1615			1/2	1620	23,1	450	17	75	3	6			
IV 1615			1/2	1520	21,7	160	16	75	4,5	7			
I 2590	37	2,7	4	2492	35,6	73	3-11	(13j)	11	23	51	88	
II 2590			4	2440	35	70	3	(13j)	11	25,5			
III 2590			1/2	2510	35,9	560	28-10	(7j)	1,5	2,85			
IV 2590			1/2	2584	35,8	52,0	28-10	(7j)	1,5	2,85			

Vr : volume d'eau reporté pour chaque arrosage

H ; hauteur d'eau en mm

Tr : temps de réponse

Vd : volume d'eau drainé par chaque "bac"

qm : débit maximum observé en mm en une heure

D : durée total du drainage

T₂₅ : temps nécessaire pour que 25% du drainage total soit écoulé

correspondant à l'arrosage du 16 septembre, avec 14,3 mm et à celui du 21 octobre avec 37 mm (série de tableaux 2 - II - 1)

. 32 heures à 100 heures pour le bac de 100 cm (série de tableaux 2 - II - 1)

. 50 heures à 13 jours pour les bacs de 150 cm correspondant aux arrosages du 22 juillet avec 28 mm et du 21 octobre avec 37 mm (série de tableaux 2 - II - 1)

D'autre part, on a observé que d'après un arrosage du 3 novembre 1968, le drainage continue pendant presque 1 mois dans les bacs profonds.

4. - La décroissance du débit est très rapide dans les bacs peu profonds après son passage au maximum le débit observé tombe au cours de 3 à 4 heures à des valeurs très faibles (1 ml/h), (1/70 de mm/h) puis il reste presque constant pour finalement s'annuler brutalement. Mais il n'en est pas de même pour les bacs plus profonds ; la courbe de décroissance a une forme très étendue dans le temps et une pente assez faible. Elle subit des fluctuations au cours de 24 heures. Comme nous l'avons déjà dit, ces fluctuations sont plus ou moins importantes suivant la teneur en eau du bac ; leur amplitude devient moins grande au fur et à mesure que l'on s'approche du tarissement ; par contre, le rapport du débit maximum de chaque oscillation au débit minimum qui le précède, garde longtemps des valeurs élevées (par exemple, ce rapport est de l'ordre de $\frac{105}{39} = 3,5$ pour les variations du 30 juillet du bac N° II quand la teneur en eau de ce bac est encore très élevée et de $\frac{25}{1} = 25$ au 7 août lorsque presque 99,5 % du drainage est écoulé. On voit que ce rapport a tendance même à augmenter à la fin de l'épisode (Voir graphiques II - 2 - 1 à II - 2 - 4).

Ces oscillations sont observées également pour le bac de 100 cm et même les bacs de 50 cm lorsque la quantité d'eau apportée est grande. Mais n'ayant pas été observées dans les cases lysimétriques, on peut se demander si elles sont provoquées par des variations de température à l'intérieur de la terre, variations qui seraient de plus faible amplitude dans les cases que dans les bacs, ou s'il intervient d'autres causes que l'amplitude thermique, relevant de microclimat existant dans les serres où sont situés les bacs, ou enfin s'il intervient d'autres causes liées à l'état du sol telles que son humidité ou bien des différences concernant la structure (la terre vient d'être placée dans les bacs alors qu'elle est dans les cases depuis à peu près 15 ans.

5. - La différence entre la hauteur d'eau utilisée pour l'arrosage au cours de tous les essais et celle recueillie par le drainage n'est pas très élevée. Ainsi, comme on voit dans le tableau ci-dessous :

Hauteur d'eau totale apportée (mm)	Drainage total (mm)			
	BAC I	BAC II	BAC III	BAC IV
390,5	341,0	350,0	360,7	367,8
Perte	49,5	40,5	29,8	22,7
Perte en % d'eau apportée	12,67	12,4	7,62	5,82

La perte est de l'ordre de 12,4 à 12,67 % pour les bacs profonds et de 5,82 à 7,62 % pour ceux moins profonds (50 cm). D'autre part, les trois bacs de 100 et 50 cm ont été pesés le 9 janvier 1969 et le 1er décembre de la même année ; pendant cette période, les bacs ont été bien protégés contre l'évaporation. La différence de poids pendant presque un an est de 1,65 et 1,40 et 5,40 kg respectivement pour les bacs III, IV (50 cm) et C (100 cm). Ces quantités d'eau correspondent respectivement à des hauteurs d'eau de 23,6, 20 et 77 mm. Rappelons que l'humidité de la terre dans les bacs III et IV a été après la première vidange : 36,6 et 34,75 % de la terre sèche. Nous venons de voir que, pendant la durée des essais, le drainage a été inférieur à la quantité d'eau utilisée pour l'arrosage. La différence est équivalente à une humidité de 4,64 %, pour le bac III et 3,0 % pour le bac N° IV. La différence de poids au cours de ce temps montre une augmentation équivalente à 1,1 et 2,34 % pour les deux bacs ; la différence de ces deux valeurs pour chaque bac montre l'humidité perdue par l'évaporation tout au long des essais : elle correspond à $4,60 - 1,1 = 3,50$ % pour le bac III et de $3,45 - 2,34 = 1,10$ % pour le bac N° IV. L'humidité finale d'après les pesées au 1er décembre 1968 est de 33,8 % pour le bac III et 34,10 % pour le bac N° IV.

Le bac C (100 cm) installé au voisinage immédiat d'une serre chaude semble avoir été influencé par celle-ci, ayant perdu 3 à 4 fois plus que les autres (77 mm). Ajoutons que le dernier arrosage étant effectué le 3 novembre 1969 et le drainage ayant pris fin un mois plus tard, nous avons observé le 16 décembre une quantité importante de drainage, ainsi que les petits morceaux de glaçons à la surface des quatre bacs. On peut donc penser que ce drainage a pour cause l'effet de gel et dégel qui se produit à la surface du bac, ainsi qu'à la limite du fond drainant et la terre du bac ; c'est l'effet des parois froides qui cause l'accumulation de l'humidité et la condensation pour former le gel.

6. - Comme pour les cases lysimétriques, nous avons calculé le nombre de jours de drainage pour chaque essai par rapport aux différentes intensités du débit. Nous avons maintenu comme seuil la valeur de 0,5 mm/j entre les débits faibles et les débits de fortes intensités. Le tableau 2 - II - 2 présente pour les quatre bacs et pendant tous les essais, le nombre de jours de drainage se trouvant dans les classes du débit suivant :

	$q > 1,5$ mm/j	équivalent à	105 ml/j
1,5	$> q > 0,5$ mm/j	équivalent à	35 ml/j
0,5	$> q > 0,15$ mm/j	équivalent à	10,5 ml/j
0,15	$> q > 0$ mm/j		-

débit mm/h

Fig. II-3-1

HYDROGRAMMES ET COURBES DU DRAINAGE CUMULE DES BACS EXPERIMENTAUX

26 juillet 1968

Arrosage avec 28,5 mm d'eau reportées à la fois (à deux reprises avec l'intervalle de 2 heures)

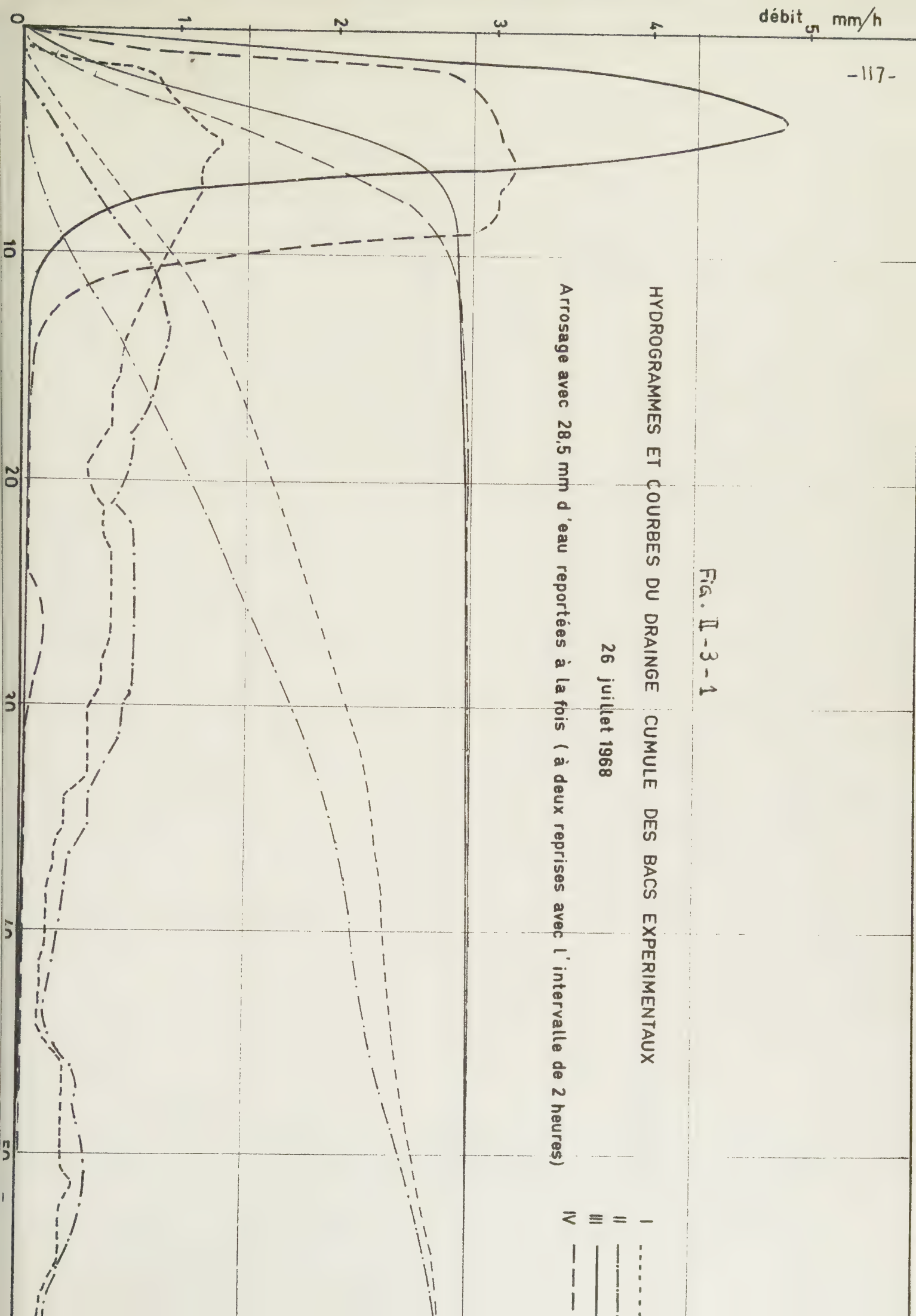


Fig. II-3-2

HYDROGRAMMES ET COURBES DU DRAINAGE CUMULE DES BACS EXPERIMENTAUX
Arrosage avec 20 mm d'eau réparties sur 8 heures
30 Aout 1968

- I 150 cm
- II 150 cm
- III 50
- IV 50

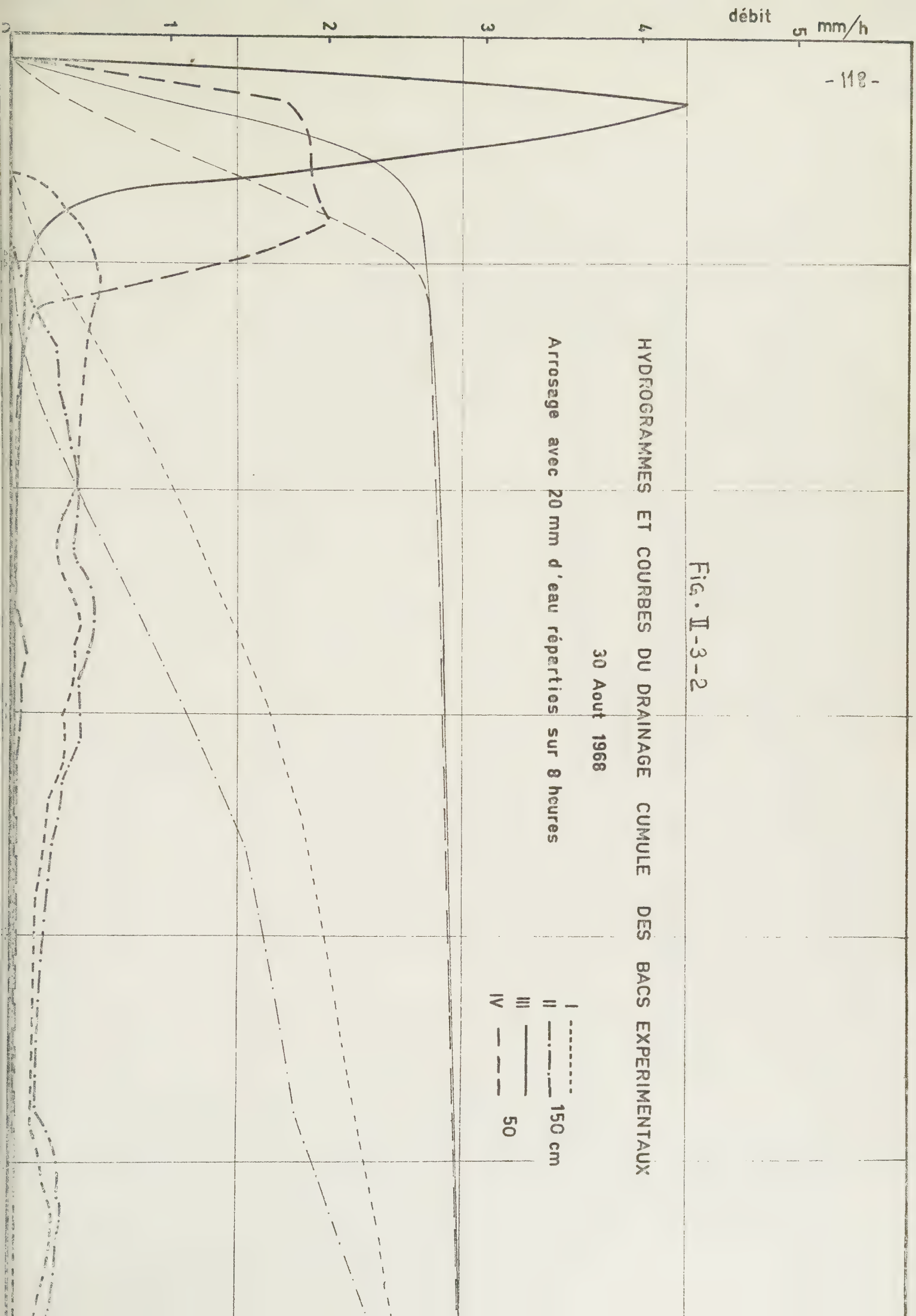
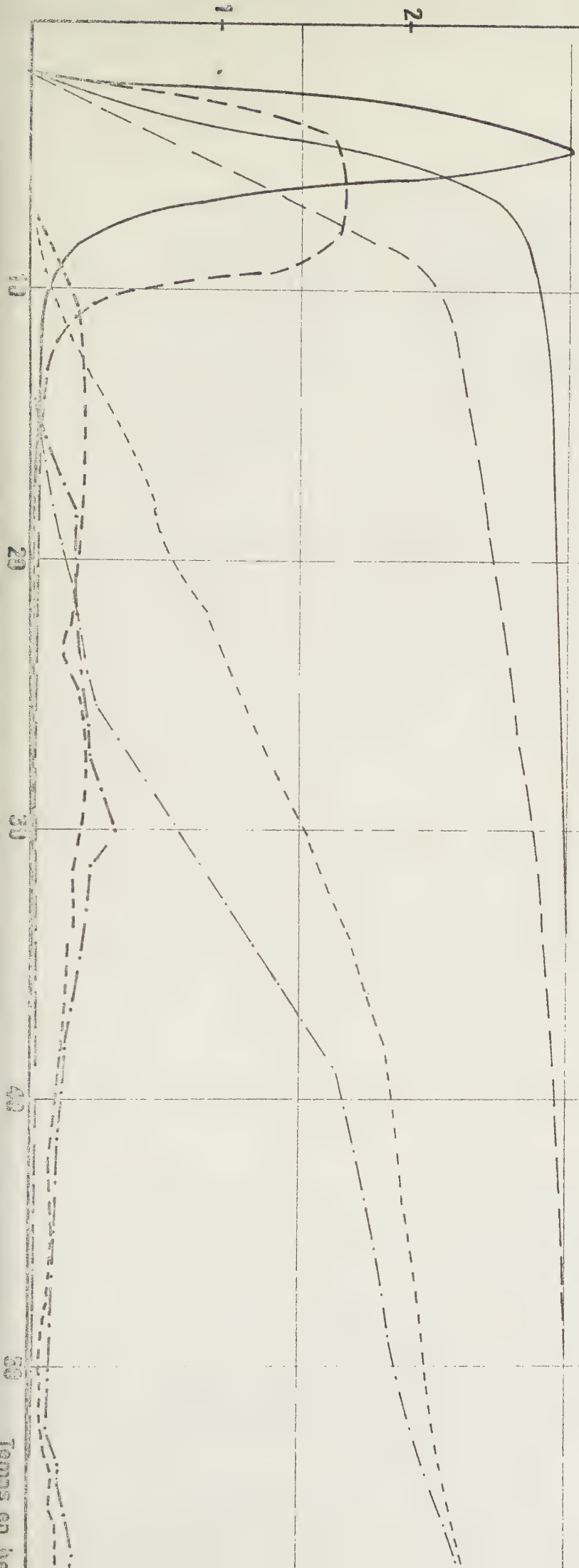


Fig. II-3-3

HYDROGRAMMES ET COURBES DU DRAINAGE CUMULE DES BACS EXPERIMENTAUX

16 Septembre 1968

Arrosage avec 14,3 mm d'eau réparties sur 3 heures



Temps en he

0,15 mm/j correspond à un volume de 10,5 ml/j pour les bacs, c'est-à-dire un basculement du pluviographe tous les deux jours que nous avons traité comme débit nul ; exceptionnellement, pendant les deux derniers essais, nous avons pu suivre le drainage pendant quelques jours : les mesures ont été effectuées alors par des moyens plus simples que le pluviographe, on recueillait les quelques gouttes du drainage et on les mesurait. Pour les essais précédents, une telle mesure aurait donné des valeurs rigoureusement nulles car à ce stade, il n'apparaît pas la moindre goutte d'eau à l'exutoire. De même, pour le débit inférieur à 0,5 mm/j (35 ml/j), le nombre de jours de drainage est limité. La majeure partie du drainage s'effectue donc avec un débit supérieur à 0,5 et même 1,5 mm/j, c'est-à-dire avec un débit intense. Le rapport du drainage total avec le débit supérieur à 0,5 mm/j au drainage total avec le débit inférieur à cette valeur est respectivement 7,25, 8,3, 23, et 31,5 pour les bacs I, II, III et IV (par exemple du 3 novembre) ; autrement dit, le pourcentage du drainage total écoulé avec des forts débits est de 87 %, 89 %, 93 % et 94,5 % pour ces bacs ; pour les autres cas, ce rapport est toujours supérieur à 85 %. Sur la série de tableaux 2 - II - 1, nous avons donné le temps nécessaire pour écouler 25 et 55 % du drainage total de chaque bac ; on voit que la durée maximum de ce temps est de l'ordre de 40 heures pour un bac profond le 14 octobre 1969 et 7 heures 1/4 pour un bac moins profond le 25 septembre 1969.

7. - En ce qui concerne le tarissement, les courbes correspondant à plusieurs arrosages sont présentées pour chaque bac séparément sur les diagrammes semi-logarithmiques que les figures II - 4 - 1 à II - 4 - 4 présentent. L'origine de chaque courbe est l'heure où le débit maximum correspondant s'est produit. On aperçoit que, pour tous les bacs, pendant un intervalle de temps qui varie de

10 à 29 heures pour le bac N° I	(150 cm)	Fig. II - 8
10 à 30 heures pour le bac N° II	(150 cm)	Fig. II - 9
12 à 17 heures pour le bac N° III	(100 cm)	Fig. II - 10
4 à 6 heures pour le bac N° III	(50 cm)	Fig. II - 11
4 à 8 heures pour le bac N° IV	(50 cm)	Fig. II - 12

la courbe de décroissance du débit est à peu près un segment de droite, c'est-à-dire que la vidange au cours de cet intervalle suit avec une approximation que nous estimons bonne, la loi exponentielle $q_t = q_0 e^{-\alpha t}$

La différence de pentes des droites des bacs de différentes profondeurs semble bien être en relation avec l'épaisseur de la couche drainante de chaque bac.

Ces comparaisons entre pentes selon la profondeur des bacs ne sont bien sûr possibles que dans la première partie des courbes de décroissance ; nous avons vu, en effet, pourquoi ultérieurement les courbes ne sont plus comparables :

- d'une part, les bacs peu profonds ayant vu leurs débits décroître très rapidement, ceux-ci ont des valeurs très faibles ou nulles et leur étude est interrompue

- d'autre part, les débits des bacs profonds présentent souvent des oscillations journalières.

Il faut finalement ajouter que l'intensité d'arrosage (arrosages instantanés ou étalés sur quelques heures) semble ne pas avoir d'influence sur la durée totale du drainage. Il serait intéressant de reprendre de tels essais avec les différences de l'intensité beaucoup plus importantes. Signalons que dans ce cas, de grandes précautions doivent être envisagées pour limiter l'évaporation.

Tableau 2-II-2

Classe de débit mm/j	18 Juil	23 Juil	26 Juil	22 Août	26 Août	30 Août	5 Sept	11 Sept	16 Sept	20 Sept	25 Sept	30 Sept	7 Oct.	14 Oct.	21 Oct.	4 Nov.	BAC I			
q > 1,5	4	3	3	2	2	2,4	3	3	1	0,5	0,5	4	3,5	4	4	1				
1,5 > q > 0,5	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	2	3	1	3	10				
0,5 > q > 0,15	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	3	5	5				
0,15 > q > 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	15				
Volume drainé L	1,22	1,12	2,06	1,32	1,26	1,22	1,16	1,00	0,76	1,62	1,95	1,80	1,76	1,61	2,49	1,562				
q > 1,5	4	3	4	2	2	2	3	2	1	3	2,5	5	3,5	5	5	2				
1,5 > q > 0,5	1	1	0	2	2	2	0	1	1	0	1	1	3	2	2	9				
0,5 > q > 0,15	0	0	0	0	0	1	1	2	0	1	0	1	1	0	5	8				
0,15 > q > 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12				
Volume drainé L	1,24	1,12	2,06	1,40	1,08	1,26	1,20	1,16	0,76	1,60	1,84	2,00	1,76	1,60	2,44	1,77				
q > 1,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1	1,5	1	1	1	1				
1,5 > q > 0,5	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1				
0,5 > q > 0,15	1	1	1	0	1	0	2	0	0	1	0	0	2	1	2	2				
0,15 > q > 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3				
Volume drainé L	1,26	1,20	1,82	1,70	1,28	1,27	1,32	1,29	0,80	1,56	2,00	1,94	1,77	1,62	2,51	1,91				
q > 1,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
1,5 > q > 0,5	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	2	0	1	0	1				
0,5 > q > 0,15	1	1	1	0	0	0	2	0	0	1	0	0	2	1	2	2				
0,15 > q > 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3				
Volume drainé L	1,32	1,28	1,96	1,80	1,26	1,20	1,26	1,46	0,86	1,54	2,00	2,00	1,75	1,52	2,58	1,95				
Volume d'eau apportée L	1,40	1,40	2,00	2,00	1,40	1,40	1,40	1,40	1,00	1,90	2,00	2,00	1,73	1,61	2,59	2,10				

Fig. II-4-1
DECROISSANCE DU DEBITS DU BAC N° 1

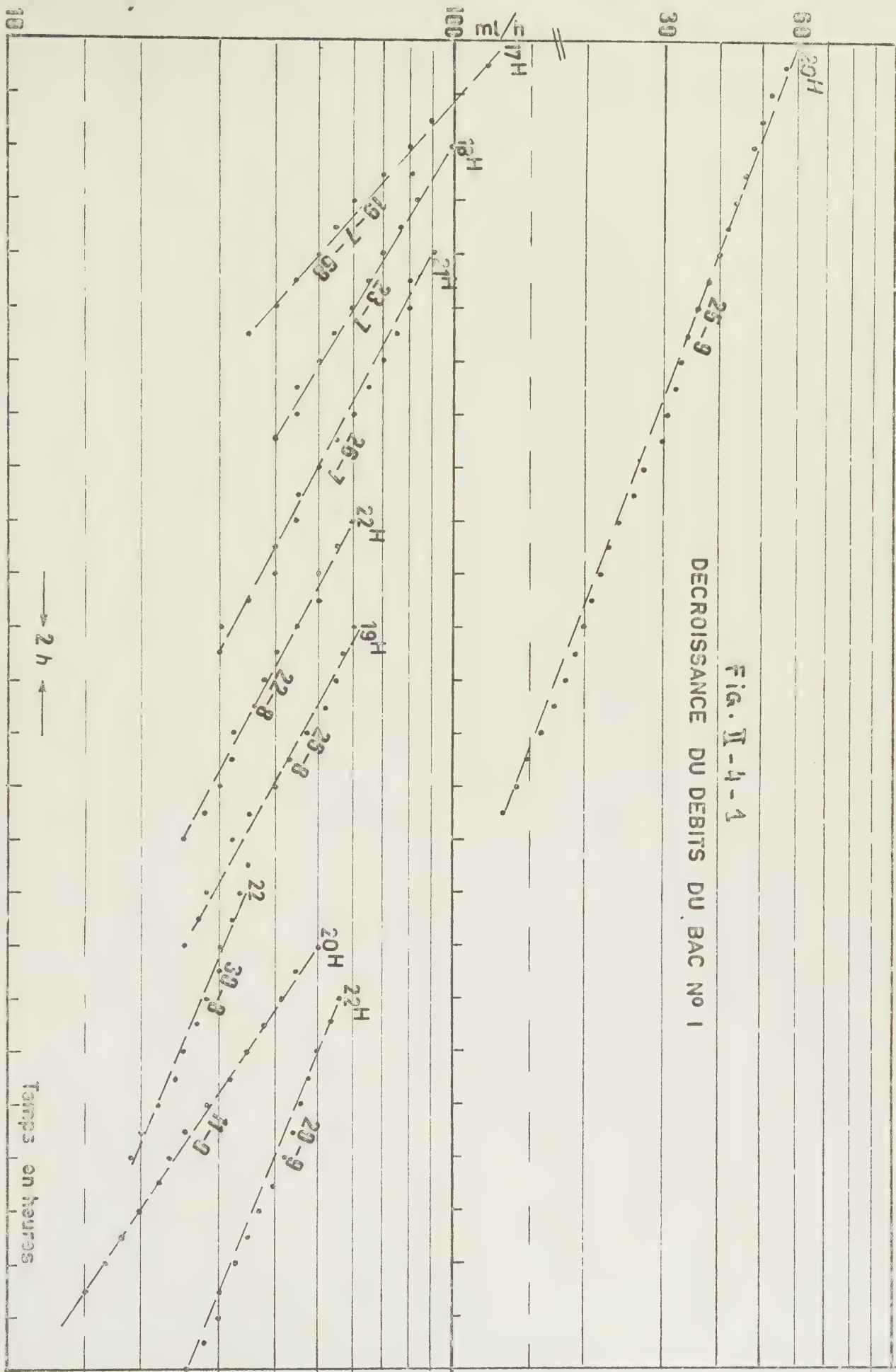
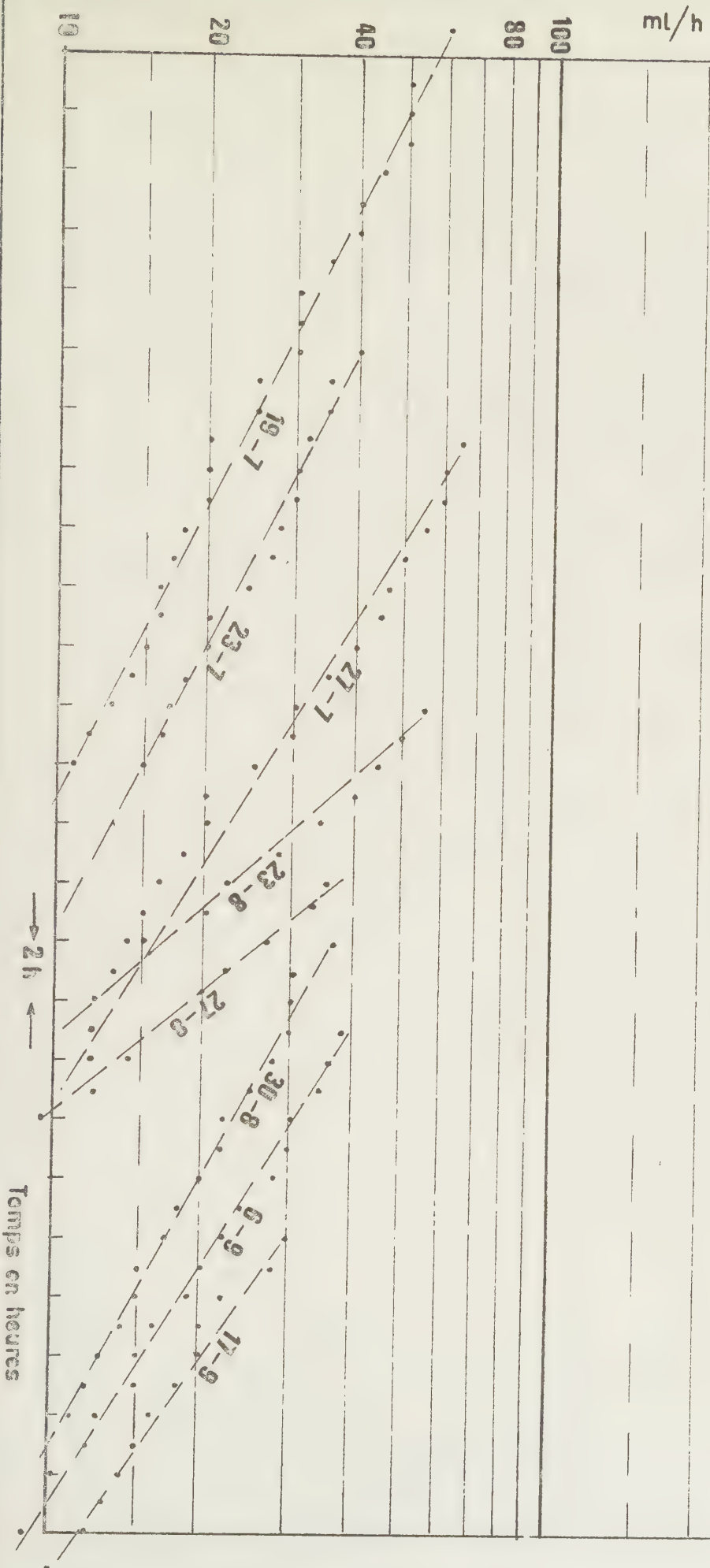


FIG. II-4.2

DECROISSANCE DU DEBIT DU BAC N° II (150 cm)



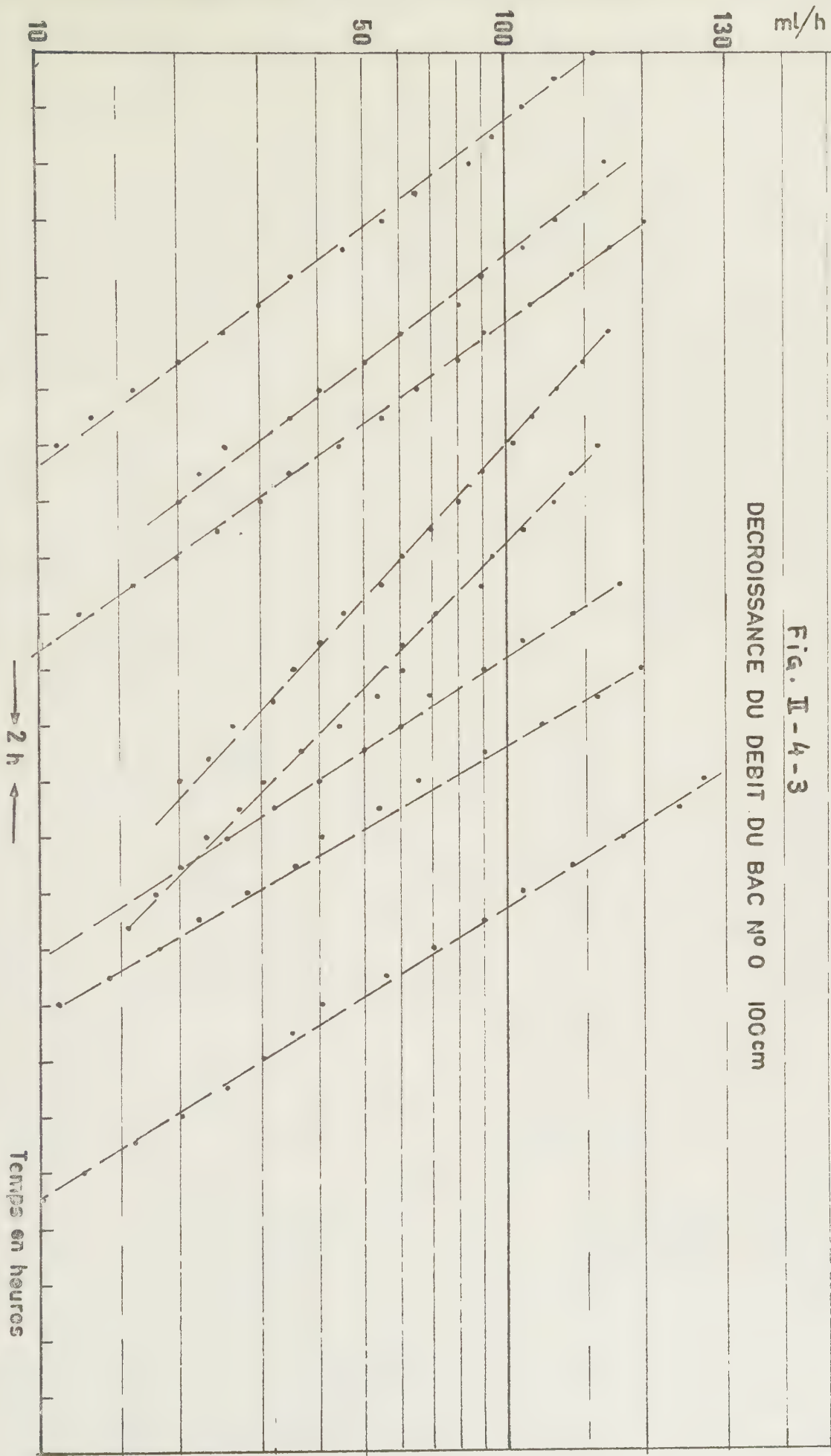


Fig. II-4-3
DECROISSANCE DU DEBIT DU BAC N° 0 100 cm

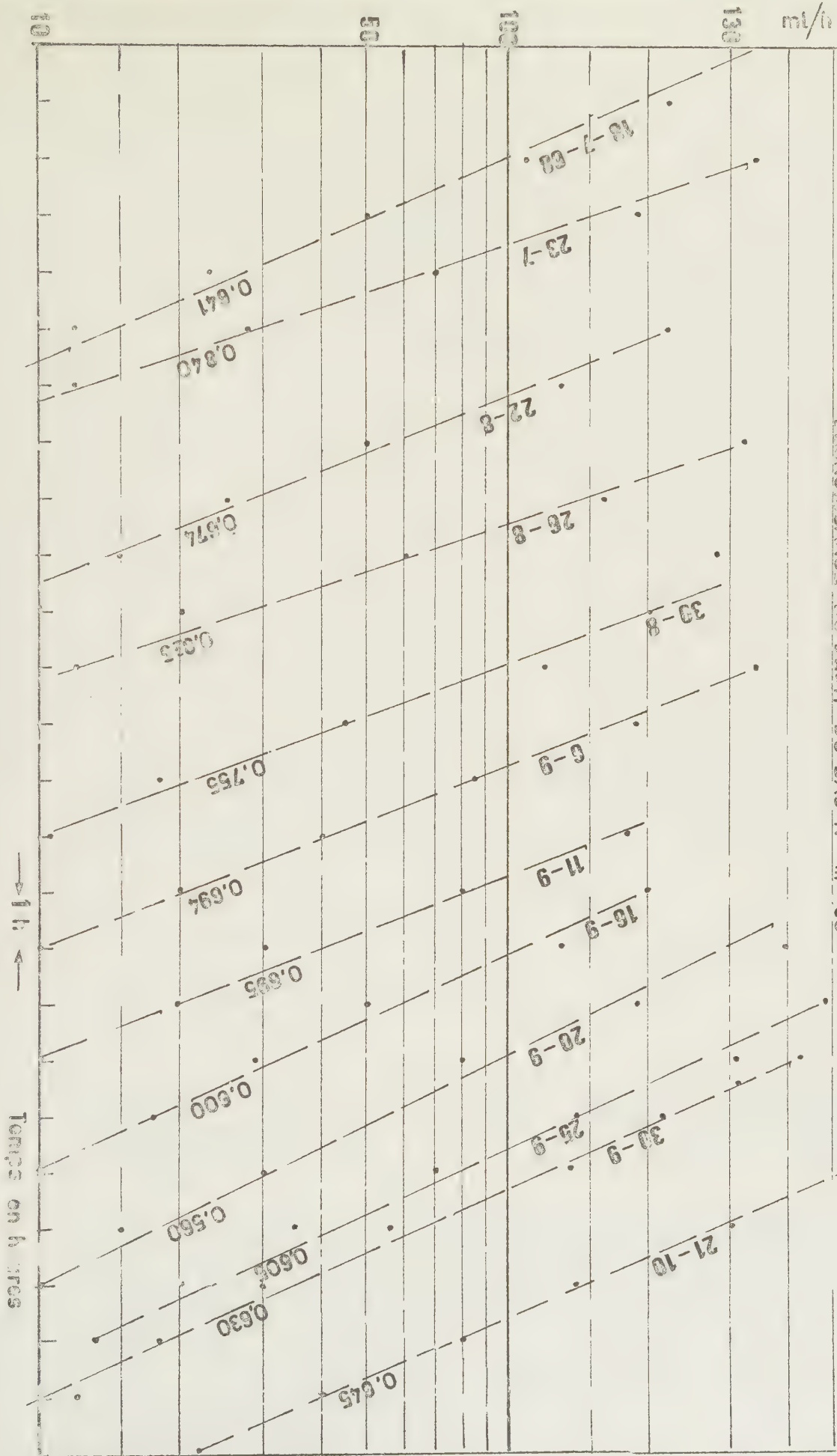


FIG. II-4-4
PERFORMANCE DU PETIT DU BAC N° III 50cm

TROISIEME PARTIE

=====

EXAMEN DE MODELES

INTRODUCTION

Nous avons fait quelques essais de confrontation entre des résultats expérimentaux exposés précédemment et des valeurs calculées pour des modèles capillaires très simples ; avant de présenter ces confrontations (Voir II), on va d'abord résumer (I) quelques calculs faits sur le modèle le plus simple.

I. - Ecoulement de l'eau dans un cylindre capillaire

I. - 1 - Calcul du débit à une température donnée

Soit un cylindre capillaire se vidant dans un plan d'eau libre, (dans lequel il plonge sur une longueur négligeable) jusqu'à ce que le ménisque eau-air, situé initialement plus haut que sa position d'équilibre (qui est à une hauteur $\frac{2\sigma}{r\rho g}$ au-dessus du plan d'eau), atteigne cette position.

La mise en équation du mouvement résulte des lois de Jurin (1718) et de Poiseuille (1844) ; elle est indiquée par H. Bouasse (Capillarité, 1924). L'équation obtenue, à des variables séparées, s'intègre immédiatement en donnant le temps (et le débit) en fonction de la hauteur du ménisque ; le calcul permet alors de passer point par point à la hauteur (et donc au débit) en fonction du temps.

Le débit décroît progressivement ; le calcul montre que sa décroissance en fonction du temps prend une allure presque exponentielle à la fin, lorsque le débit est prêt à s'annuler ; antérieurement, au contraire, elle est bien différente d'une décroissance exponentielle. On a précisé ceci

en utilisant un "indice d'exponentialité" :

Cet indice est le quotient de 2 intervalles de temps successifs, au cours desquels le débit décroît de la même fraction ; si par exemple, on utilise pour cette fraction la valeur $\frac{1}{10}$, le débit à l'instant t_1 étant pris comme unité, il sera de 0,9 à l'instant t_2 et de 0,81 à l'instant t_3 ; si l'indice $\frac{t_3 - t_2}{t_2 - t_1}$ vaut 1, les trois points considérés sont situés sur

une courbe exponentielle ; on est d'autant plus loin de l'exponentialité que l'indice est plus différent de 1, plus proche de zéro (quand le rapport $\frac{t_3 - t_2}{t_2 - t_1}$

est > 1 , nous utilisons son inverse comme indice) ; supposons par exemple que l'indice vaille 0,93, cela signifie que l'extrapolation exponentielle ajustée sur les points d'abscisses t_1 et t_2 évalue l'intervalle de temps $t_3 - t_2$ avec une erreur de 7 p. 100 par excès ($1 - 0,93 = 0,07$).

Dans le problème traité, le calcul montre que la valeur de l'indice est une fonction du rapport $\frac{h}{h_{\text{eq}}}$, h étant la hauteur du ménisque

au-dessus du plan d'eau et h_{eq} la valeur $\frac{2A}{r^2 g}$ que prendra h à l'équilibre.

Si on utilise pour facteur de réduction le nombre 0,9, l'indice prend la valeur 0,915 quand $\frac{h}{h_{\text{eq}}} = 1,5$, et croît à mesure que $\frac{h}{h_{\text{eq}}}$

décroît, les deux termes tendant ensemble vers 1 ; par contre, lorsque $\frac{h}{h_{\text{eq}}}$ est très supérieur à 1,5 l'indice a des valeurs très faibles ; c'est

bien le résultat annoncé : l'exponentialité n'apparaît qu'en fin d'écoulement.

Si on considère le débit total donné par des capillaires de différents rayons, les possibilités sont plus variées qu'avec des rayons égaux entre eux.

I. - 2 - Influence de la température

On a vu, dans la deuxième partie, que lors de l'étude du tarissement des "bacs", il s'est produit des oscillations diurnes du débit, corrélatives des variations de la température de l'air. De leur côté, des auteurs, étudiant le drainage de basses topographiques, ont observé des corrélations entre débit et température, et ont pu attribuer ces corrélations aux variations de viscosité : celles-ci, dues aux variations de température, influent sur les débits (H. L. Penman et R. K. Schofield, 1941).

C'est pourquoi nous avons calculé les débits de l'eau dans des cylindres capillaires installés comme précédemment, mais à différentes températures (entre $+5^\circ\text{C}$ et $+25^\circ\text{C}$). L'étude a été conduite en deux temps.

1° d'abord, on a évalué dans quelle mesure l'influence de la température pourrait se réduire à son influence sur la viscosité de l'eau.

2° ensuite, en s'appuyant sur l'étude précédente, on a examiné

si les calculs auxquels se prête le modèle très simple considéré (influence de la température de l'eau sur sa viscosité et sur sa tension superficielle) semblaient entraîner ou non l'élimination d'hypothèses attribuant les oscillations diurnes de débit de nos "bacs" aux variations de viscosité et de tension superficielle (cette seconde partie sera exposée plus loin, en II - 2).

Considérons deux capillaires identiques, avec les ménisques à même hauteur, mais situés dans deux enceintes isothermes à températures différentes ; soit à cet instant v_1 et v_2 les vitesses des deux ménisques (proportionnelles aux débits), correspondant aux températures θ_1 et θ_2 , avec les viscosités η_1 et η_2 ; dans le modèle considéré, seules interviennent la masse volumique de l'eau, la tension superficielle eau - air (on a fait les calculs pour le cas où la mouillabilité serait parfaite et le resterait indéfiniment), et la viscosité de l'eau ; l'effet sur le débit des différences de masses volumiques est négligeable pour des températures allant de 5°C à 25°C ; il reste l'influence des différences de viscosité et des différences de tension superficielle ; pour exprimer dans quelle mesure l'influence des différences de viscosité prédomine, nous avons calculé le rapport

$$R = \frac{v_1}{v_2} - 1 \quad / \quad \frac{\eta_1}{\eta_2} - 1$$

le calcul montre que R est une fonction de $\frac{h}{h_{\text{eq.}}}$; tant que $\frac{h}{h_{\text{eq.}}} > 1,5$

le rapport R reste compris entre 0,99 et 1,15 ; au contraire, lorsque on considère des ménisques situés de plus en plus bas (des valeurs $h/h_{\text{eq.}}$ de plus en plus proches de 1), le rapport R prend des valeurs de plus en plus élevées ; ainsi pour $\frac{h}{h_{\text{eq.}}} = 1,06$, R est voisin de 2 : l'influence

de la différence de température est double de ce qu'elle serait si seules les viscosités étaient différentes, puis pour $\frac{h}{h_{\text{eq.}}} < 1,06$ l'influence des différences de tensions superficielles est prépondérante.

II. - Essais de confrontation avec des résultats expérimentaux concernant l'eau du sol

II. - 1 - Tarissement et tubes capillaires

On sait que, de façon générale, les modèles constitués de tubes capillaires (chaque tube allant sans interruption de l'extrémité amont à l'extrémité aval) ne rendent dans l'étude des milieux poreux que des services très limités. Nous allons néanmoins exposer quelques essais qui ont été faits pour ajuster des modèles très simples de ce type d'après les observations faites sur le drainage des cases et des bacs, en particulier d'après les courbes de tarissement obtenues lors des "vidanges des bacs

expérimentaux⁽¹⁾ (car la situation est plus proche de celle de tubes initialement pleins d'eau).

Les modèles envisagés ont tous la même hauteur que la colonne de terre contenue dans le "bac" à représenter. On a d'abord vérifié que l'évacuation de l'eau contenue dans des cylindres ayant tous même rayon ne peut aucunement représenter en temps réel le tarissement des cases lysimétriques, ceci est d'ailleurs bien connu ; nous avons donc tenté de compléter le modèle en introduisant les facteurs inégalité des rayons et tortuosité (par contre, nous n'avons pas essayé d'examiner de cas où la mouillabilité ne serait pas parfaite ; si, tout en n'étant pas parfaite, elle était constante, la prise en compte de cette propriété serait équivalente à l'abaissement de la valeur du terme A , remplacé alors par $A \cos \alpha$).

Avec des tubes en hélice, de section circulaire (1) l'équation qui donne le mouvement de l'eau dans un tube capillaire cylindrique reste valable, les valeurs des termes constants utilisés précédemment sont simplement modifiées par introduction de la tortuosité.

Avec trois ou quatre espèces de tubes, ceux de chaque espèce étant identiques entre eux mais différents des autres par le rayon et par la porosité qu'on leur affecte (rapport du volume intérieur de ces tubes au volume total du modèle), nous avons constaté qu'on peut obtenir des écoulements calculés reproduisant suffisamment bien ceux de bacs de 150 cm de profondeur (depuis le maximum initial de débit, lors de la "vidange", abstraction faite de l'eau située au-dessous de la terre, jusqu'au lent tarissement final) pour suggérer la possibilité d'obtenir un bon accord en accroissant modérément le nombre de valeurs différentes de r ; les tortuosités utilisées dans le modèle ont des valeurs qui pourraient avoir quelque signification physique dans le cas du sol (par exemple, tortuosité de 3 pour des tubes ayant un rayon de 30μ) ; du même point de vue, les rayons des tubes et les porosités sont situés dans des ordres de grandeur admissibles. Par contre, si on veut faire l'ajustement non seulement sur l'écoulement de bacs de 150 cm, mais également sur celui de bacs de 50 cm, (emploi de modèles ne différant que par leurs hauteurs : respectivement 150 et 50 cm), l'insuffisance de tels modèles se manifeste : on est conduit à introduire des tortuosités beaucoup plus élevées, de 10 à 15 par exemple pour obtenir des débits calculés et les rapprocher des débits observés.

Néanmoins, une propriété de ces modèles mérite peut-être d'être signalée, car elle semble refléter, en l'exagérant, une propriété des cases et des bacs qui est bien apparue dans les deux parties expérimentales précédentes : le tarissement des modèles de 50 cm de hauteur est beaucoup plus brutal que celui des modèles de 150 cm (exemple : un capillaire dont le rayon mesure 12μ , s'il est plein jusqu'à 150 cm au-dessus du plan d'eau se videra sur une hauteur de 25 cm, puisque son ascension capillaire est de 125 cm dans les conditions envisagées, et cet écoulement sera très lent si le tube a une tortuosité convenable ; par contre, un tube de même rayon, dans le modèle de 50 cm de hauteur, ne donne aucun écoulement s'il n'est pas alimenté par son ouverture supérieure)

(1) Il s'agit plus exactement de la surface cannelée engendrée par une sphère de rayon constant dont le centre se déplace sur une hélice circulaire.

II. - 2 - Oscillations diurnes du drainage

Ces oscillations ont été observées dans les drainages des "bacs expérimentaux" situés en serres froides ; nous avons vu qu'elles sont en corrélation avec des oscillations thermiques. On peut se demander si elles sont dues pour une part plus ou moins grande, à des effets microbels, à des mouvements de gaz avec éventuellement des évaporations et des condensations, à des variations de volume de bulles de gaz, à des modifications du squelette solide du sol, etc... ; d'après ce qui suit, il ne semblerait pas exclu qu'interviennent notablement les variations de tension superficielle de l'eau.

Simplifions les choses à l'extrême : soient par exemple des capillaires ayant 50μ de rayon plongeant par les extrémités inférieures dans une nappe d'eau libre ; à 15°C , leur "ascension capillaire" est de 30 cm. Si en quelques heures, la température de l'eau passe à $17,5^\circ \text{C}$ ce qui est admissible (cf. les mesures de température faites dans les bacs), l'ascension capillaire devient 29,85 cm, en raison de la diminution de A (eau pure, mouillabilité parfaite ; l'effet de la variation de masse volumique est faible) ; si l'eau, dans ces tubes, était initialement à sa position d'équilibre, il s'écoulera pendant cette période d'échauffement $300 - 298,5 = 1,5 \text{ mm}$ d'eau ; pour calculer la hauteur d'eau écoulee en rapportant le volume à la section totale du modèle, il faut multiplier 1,5 mm par la porosité et par la tortuosité.

Ce résultat ne paraît pas incompatible avec les observations ; c'est ainsi que, au cours de ces oscillations thermiques, un bac peut écouler, en 24 heures, 1 mm dont la majeure partie s'écoule pendant quelques heures de pointe (4 heures par exemple) ; le caractère brusque du phénomène (cette concentration de l'écoulement sur quelques heures) peut être simulé avec des capillaires dont l'eau ne serait que pendant quelques heures par jour à une température suffisamment élevée pour que la hauteur d'ascension capillaire soit inférieure à la hauteur d'eau présente dans les tubes (cote du ménisque au-dessus de l'eau libre). On sait d'autre part qu'une élévation de température de l'eau de, par exemple, 5°C entraîne une baisse d'environ 20 p. 100 de sa viscosité, c'est donc une augmentation de cet ordre pour le débit que l'on pourrait attendre avec des tubes où la hauteur d'eau serait largement supérieure à l'ascension capillaire (cas où prédomine l'effet viscosité) ; les cas où prédomine l'effet tension superficielle donnent au contraire des variations relatives du débit beaucoup plus fortes et susceptibles d'être resserrées sur quelques heures, comme nous l'avons observé sur les bacs. Notons que, dans ces conditions où les tubes ont perdu la plus grande partie de leur eau en excès (et c'est bien la situation réalisée dans les bacs un jour ou deux après le début de la vidange), il semblerait que le modèle soit un peu moins éloigné de la réalité que précédemment : en effet, on n'a plus à prendre en compte que des morceaux de tubes (leurs parties inférieures), néanmoins dans l'exemple traité (rayons de 50μ), ces morceaux sont encore fort longs puisqu'ils s'étendent sur au moins 30 cm selon la direction verticale.

Nous n'avons pas examiné les effets complexes exercés par les gradients de température sur les mouvements d'eau liquide et de vapeur à l'intérieur des bacs ; ils jouent vraisemblablement un rôle notable à ce stade ; en ce qui concerne les sorties d'eau par évaporation, nous avons seulement cherché à nous placer dans des conditions où elles sont faibles par rapport au drainage.

II. - 3 - A propos d'autres modèles (égouttage)

Le modèle constitué de tubes (de section constante sur toute leur longueur) qui restent pendant plusieurs jours parfaitement mouillés par des films d'épaisseur invariable est purement idéal (non seulement il ne simule que de façon lointaine ce qui se passe dans le sol, mais si on expérimente sur de tels capillaires, l'écoulement ne s'y produit pas aussi simplement que d'après les calculs précédents) ; ainsi, pour revenir aux oscillations diurnes, si des tubes dans lesquels la hauteur d'eau est proche de l'ascension capillaire drainent aux heures où l'eau est plus chaude, on conçoit que l'effet puisse se répéter le jour suivant : entretemps les films d'eau restés dans les parties supérieures s'amenuisent lentement, et l'eau évacuée reconstitue dans les parties inférieures, les colonnes d'eau qui drainent périodiquement. De façon plus générale, on pourrait envisager des modèles composites (avec peut-être des faisceaux capillaires séparés par des cavités de plus faible courbure) faisant une large part, à côté de l'écoulement dans des tubes, aux effets d'égouttage (effets d'égouttage à rapprocher de ceux qu'on observe sur des objets mouillés, après une pluie par exemple) ; ces modèles concernant le ressuyage lorsque l'humidité est peu supérieure à la capacité de rétention, se rapprochent du schéma selon lequel, dans le sol, à la capacité de rétention, l'eau serait pour une bonne part présente "sous forme d'amas dissociés limités par des ménisques" comme l'écrit Féodoroff en citant des communications de Rode et de Smith (1936)

RESUME ET CONCLUSIONS GENERALES

Au cours de cette étude, nous avons effectué des comparaisons entre les drainages de cases lysimétriques à sol nu et fond librement drainé qui ont des profondeurs différentes (150, 100 et 50 cm) ; la plupart sont remplies du même matériau (horizon E de Versailles) et ont une surface de 2 m².

Nous avons étudié l'évolution du débit (hydrogrammes) après une pluie suffisante pour déclencher un drainage supérieur à 5 mm.

Dans les conditions climatiques de Versailles, une nouvelle pluie vient souvent perturber l'hydrogramme correspondant à la précédente, il a donc fallu limiter cette partie de l'étude à des "épisodes sélectionnés" (pas de perturbation de l'hydrogramme jusqu'à ce que le débit soit très faible, inférieur à 0,1 mm en un jour).

Nous avons distingué les épisodes situés en saison chaude (six mois à jours longs : d'avril à septembre) de ceux situés en saison froide (six mois à jours courts : d'octobre à mars). On a utilisé les valeurs du drainage journalier, mesurées tous les jours pendant 13 ans, mais de plus, nous avons enregistré pendant deux ans le drainage de certaines cases au moyen de pluviographes qui permettent de suivre la variation du drainage dans des intervalles de temps beaucoup plus courts que la journée ; les hydrogrammes ainsi obtenus se prêtent à des études plus précises que les précédents.

Alors que le drainage total annuel de la case de 50 cm remplie du même matériau que des cases de 150 cm, ne se distingue pas systématiquement du drainage de celles-ci, les hydrogrammes sont nettement différents : nous avons constaté que lorsqu'il se produit une montée du débit à la suite d'une pluie, si le débit des cases à cet instant est faible, c'est-à-dire que l'épisode de drainage précédent est terminé, le temps de réponse est, comme on l'attend, plus faible dans la case de 50 cm que dans celles de 100 et 150 cm ; le débit de pointe Q_M est plus grand dans la case peu profonde ; par contre, si au moment où cette nouvelle pluie survient, le débit du drainage est déjà intense

($q_1 \gg 0,2$ mm par heure) c'est-à-dire avant la fin de l'épisode précédent, ce classement devient inverse : le temps de réponse est alors plus court dans la case de 150 cm que celle de 50 et le débit de pointe plus élevé se produit dans la case la plus profonde (Voir tableau III - 8 - 6).

La vitesse de transfert (le rapport de la profondeur de la couche drainante L au temps de réponse t_r), étant plus ou moins égale pour le premier cas dans les cases de différentes profondeurs, devient plus grande pour les cases profondes dans le second cas ; quand q_1 est grand.

Ces observations ont été essentiellement remarquées en saison froide, car en saison chaude, en raison de la faible humidité du sol, le calcul des différents paramètres de l'hydrogramme est difficile (insuffisance de précision sur le temps de réponse).

Après la pointe de l'hydrogramme qui se produit d'ailleurs à un instant donné, sans que le débit maximum se maintienne quelque temps, (pas de saturation donc au cours de nos observations), le débit des cases de 50 cm devient rapidement très faible ; au contraire, pour les cases de 150 cm, à une phase de décroissance rapide, succède une phase pendant laquelle un faible débit se maintient longtemps, c'est ainsi qu'on peut observer pendant deux semaines et plus, des valeurs de drainage situées entre 0,1 et 0,2 mm en un jour. Voici quelques précisions : deux à quatre jours après la fin de la pluie, le drainage tombe en-dessous de 0,5 mm/j, ce qui est un débit déjà faible (contribution au drainage annuel peu supérieur à 10 %) ; encore deux à quatre jours plus tard, le drainage de la case de 50 cm est inférieur à 0,15 mm/j, ce qui, à bien des égards, est un débit négligeable. Alors que cette phase (entre 0,5 et 0,15 mm/j) dure souvent une dizaine de jours pour la case de 100 cm et plus pour celle de 150 cm.

Ayant donc constaté que la répartition du drainage dans différentes classes de débit n'était pas la même pour les cases de profondeurs différentes, nous avons confirmé et précisé ces résultats en établissant les courbes de débits journaliers classés. Cette méthode, si elle s'éloigne de l'étude du phénomène réel, tel qu'il apparaît sur les hydrogrammes, a l'avantage, entre autres, de permettre la prise en compte de tous les drainages mesurés ; nous avons ainsi classé pour chaque case tous les débits journaliers de deux années choisies pour leurs pluviométries très différentes.

Ainsi pour le débit $\geq 0,5$ mm en un jour et pour l'année relativement sèche (1961 - 62) :
la case profonde (150 cm) draine pendant

7 jours d'Avril à Septembre 1961 avec 14 mm de drainage total
91 jours d'Octobre 1961 à Mars 1962 avec 217 mm

la case peu profonde (50 cm) draine pendant

9 jours d'Avril à Septembre 1961	avec	20,5 mm
88 jours d'Octobre 1961 à Mars 1962	avec	223,3 mm

Pour le débit $0,05 < q < 0,5$ mm en un jour et pour la même année,
la case de 150 cm draine

125 jours d'Avril à Septembre 1961	avec	16,40 mm
91 jours d'Octobre 1961 à Mars 1962	avec	23,80 mm

la case de 50 cm dans les mêmes conditions draine

25 jours d'Avril à Septembre 1961	avec	5,0 mm
80 jours d'Octobre 1961 à Mars 1962	avec	14,5 mm

La contribution des faibles débits ($< 0,5$ mm en un jour) au drainage semestriel est de 19 % pour la case 50 et de 53 % pour la case 150, le premier semestre, 6 % et 10 % pour le deuxième semestre ; la contribution au drainage de la pluviométrie du semestre étant égale pour les deux cases à 9 et 10 % le premier semestre et 80 % le second.

Pour l'année humide (1965 - 66), pour un débit $\geq 0,5$ mm en un jour
la case de 50 cm draine

25 jours d'Avril à Septembre 1965	avec	118 mm
85 jours d'Octobre 1965 à Mars 1966	avec	296,5 mm

la case de 150 cm draine

26 jours d'Avril à Septembre 1965	avec	118 mm
92 jours d'Octobre 1965 à Mars 1966	avec	313 mm

Pour le débit $0,05 < q < 0,5$ mm/j et pour la même année,

la case de 50 cm draine

31 jours d'Avril à Septembre 1965	avec	5 mm
19 jours d'Octobre 1965 à Mars 1966	avec	4 mm

la case de 150 cm draine

144 jours d'Avril à Septembre 1965	avec	25,5 mm
88 jours d'Octobre 1965 à Mars 1966	avec	14,3 mm

Contribution semestrielle de drainage avec débit $< 0,5$ mm/j

Case 50	3,9 %	et	1,3 %
Case 150	17,7 %	et	4,3 %

Nous avons construit cinq bacs expérimentaux installés à l'abri des précipitations naturelles et arrosés artificiellement. Ces bacs dont la section ne fait que $0,07 \text{ m}^2$ sont remplis du même matériau que les cases (horizon B de Versailles) avec les mêmes profondeurs de couche drainante (2 bacs à 50 cm, 2 à 150 et 1 à 100 cm). Ils ne sont pas

enterrés mais situés dans une serre froide, nous avons pris des précautions d'isolement afin de réduire le plus possible l'évaporation. Les résultats obtenus au cours des différentes expériences vont dans le même sens que ceux obtenus au cours d'étude des cases lysimétriques :

La différence entre les bacs de 50 et de 150 cm de profondeur est aussi évidente que celle observée entre les cases ; étant donné que les arrosages ont été effectués à un moment où pratiquement le drainage était épuisé (débit initial presque nul), le temps de réponse est plus élevé dans les bacs plus profonds et le débit de pointe maximum se produit dans les bacs de 50 cm, la durée de décroissance étant beaucoup plus étendue dans les bacs profonds que dans les moins profonds.

D'autre part, au cours du drainage des bacs, nous avons observé un phénomène qui ne s'est pas manifesté avec les cases lysimétriques : dans le courant de l'après-midi, il apparaît une reprise du drainage qui est souvent très accusée si bien que le maximum secondaire du débit est plusieurs fois supérieur au minimum qui le précède ; cet effet semble dû aux variations de la température, peut-être par l'intermédiaire de la variation de la tension superficielle de l'eau.

Nos observations ont soulevé certaines questions dont l'étude devrait être poursuivie par les mêmes méthodes en cases lysimétriques ou en "bacs" ; en particulier, il y aurait lieu de varier les conditions d'alimentation en eau des bacs.

Les résultats que nous obtenons sont destinés à être étendus au domaine de l'écoulement de l'eau dans le sol en place ; mais cette généralisation ne pourra être faite qu'à la suite d'études au champ, études que le travail exécuté avec des lysimètres doit permettre d'orienter.

BIBLIOGRAPHIE

=====

- BASTISSE E. M. 1951 - Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées
à l'agronomie (premier mémoire) Ann. Agr. (722 - 781)
- BOUASSE A. 1924 - Capillarité, phénomènes superficiels - Delagrave - Paris
- CASTANY G. - 1964 - Courbe de tarissement et calcul des réserves
régulatrices - A. I. H. S. N° 65
- CASTANY G. - 1967 - Traité pratique des eaux souterraines - Dunod - Paris
- CHAUVETEAU G. THERRIOT Cl. 1967 - Régimes d'écoulement en milieu
poreux et limite de la loi de Darcy - La Houille Blanche
N° 2
- COURAU M. - 1969 - Etude expérimentale de la circulation de l'eau saturante
dans les milieux poreux artificiels. Ann. Agr.
20 (3) 245 - 261
- DILEK R. - 1969 - Etude du problème du drainage d'une monocouche et d'une
bicouche par gammamétrie, Thèse de Doctorat de
l'Université de Bordeaux
- FEODOROFF A. - 1962 - Ressuyage du sol et capacité de rétention pour
l'eau Ann. Agr. 13 (6) 523 - 547
- FEODOROFF A. - 1965:- Etude expérimentale de l'infiltration de l'eau non
saturante - Thèse de Docteur-Ingénieur de la Faculté
des Sciences de Paris
- FEODOROFF A. et BALLIF J. L. - 1969 - Etude de l'infiltration de la pluie
in situ à l'aide de tensiomètres - Ann. Agr.
- FEODOROFF A. - 1969 - Infiltration et problèmes agronomiques, quelques
approches expérimentales - La Houille Blanche N° 8
- FEODOROFF A. - 1970 - Une méthode pour l'étude de l'infiltration au
champ - Comm. au Symposium International sur
l'Erosion

- FORKASIEWCIZ J. & POLAC H. - 1967 - Régime de tarissement de la
Faux de la Vis (Gard) - La Houille Blanche N° 1
- HABIB P. & SOEIRO F. - 1957 - Les mouvements de l'eau dans les sols
sous l'influence de la température C.G.B.T.P.
- HENENSAL P. - 1965 - Le lysimètre L.C.P.C. Fonction de la couche
drainante de la chaussée - Labo. Central des Ponts
et Chaussées
- HENENSAL P. - 1969 - Etudes expérimentales de l'effet de lisid dans une
chaussée - Labo. Central des Ponts et Chaussées
- HENIN S. - et Collaborateurs - 1969 - Profil cultural - L'état physique
du sol et ses conséquences agronomiques - Masson
& Cie - 2ème Edition - Paris
- PENMAN H.L. & SCHOFIELD R. K. - Drainage and evaporation from fallow
soil at Rothamsted - The Journal of Agr. Sc.
31 - 1941 - P. 76
- PUECH J. - 1969 - Etude expérimentale de la circulation de l'eau non
saturante de différents sols vers une zone d'absorption
Ann. Agron. 20 (3) - 245 - 261
- PUECH J. - 1969 - Capacité de cession de l'eau des sols et essai d'inter-
prétation des débits - Ann. Agron. 1969 20 (5)
505 - 6516
- RAMANETAS G. - 1965 - L'hydrologie de l'ingénieur Eyrolles
- ROCHE M. - 1963 - Hydrologie de surface O.R.S.T.O.M. - Gauthier-Villars
Paris
- RODE A.A. - 1966 - The nature of the minimal water retentive capacity
Coll. UNESCO Wageningen
- SMITH W.O. - 1966 - Infiltration in sands and its relation to groundwater
recharge, Coll. UNESCO - Wageningen
- SCHNEEBELI G. - 1966 - Hydraulique souterraine Eyrolles - Paris
- SOEIRO F. - 1964 - Contribution à l'étude du mouvement de l'humidité
dans les milieux poreux isothermes - Cahier de
la Recherche I.T.B.T.P. N° 18 1964

FURC L. 1953 - Le bilan d'eau des sols : relation entre les précipitations
l'évaporation et l'écoulement - Thèse Paris

VACHAUD G. - 1968 - Etude de régime transitaire de l'écoulement de
l'eau pendant le drainage des nappes · à surface
libre - La Houille Blanche N° 5

